

Construção 2022

Universidade do Minho, Campus de Azurém
Guimarães, Portugal

Volume I

5 - 7 Dezembro 2022



Universidade do Minho



Departamento
de Engenharia
Civil

rothoblaas

Solutions for Building Technology



ORDEM
DOS
ENGENHEIROS



CONSTRUÇÃO MAGAZINE
REVISTA TÉCNICA ESPECIAL ENGENHARIA CIVIL



MUNICÍPIO DE
GUIMARÃES



TECMINHO
UNIVERSIDADE DO MINHO INTERFACE



Universidade do Minho
Escola de Engenharia



Departamento de
Engenharia
Civil



Universidade do Minho

Construção 2022

Volume I

Editora

Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil.

Editores

José Aguiar, Aires Camões, Rute Eires,
Sandra Cunha e Raphaele Malheiro

Design da Capa

Vítor Costa

ISBN

978-989-8793-13-3

Dezembro de 2022

Índice

CAPÍTULO 1.....	3
MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	3
Placas sustentáveis à base de argamassas de cimento com incorporação direta de PCM	4
Durability in hygrothermal environments of GFRP composites produced by vacuum infusion. Preliminary results of an experimental study	15
Incorporação de lignina em bio-resina para aplicações em materiais compósitos	25
Estudo de parâmetros mecânicos de dois solos arenosos estabilizados com cimento.....	35
Avaliação de desempenho de argamassas auto-compactáveis com óxido de grafeno	44
Physico-chemical characterization of olive oil production residues: valorization as building materials.....	56
Intelligent System for Curing and Monitoring a Waterproof Membrane.....	65
Avaliação de compatibilidade de uma argamassa de impermeabilização com várias soluções de reforço têxtil.....	76
Estudo Comparativo de Desempenho Mecânico de Argamassas com Diferentes Tipos de Ligantes	86
Estudo experimental preliminar sobre a durabilidade em ambientes higrotérmicos de bio- laminados pultrudidos de resina de poliéster insaturado bio-derivada e fibras de carbono	93
Influência da incorporação de resíduos de construção e demolição com material de mudança de fase nas propriedades mecânicas de betões	104
Desenvolvimento de compósito a base de cânhamo e bagaço de cana-de-açúcar para blocos construtivos.....	115
Comparação das Propriedades Físicas e Mecânicas de Granitos Cinza Portugueses.....	125
O desafio da durabilidade na construção em altura com madeira	131
CAPÍTULO 2.....	139
FÍSICA DAS CONSTRUÇÕES	139
Do Levantamento com Drones à Simulação Energética – Um Caso de Estudo	140
Medição do teor de humidade em materiais de construção com a técnica time-domain reflectometry.....	151
Caracterização Multi-Performance de uma Casa Modular em Madeira.....	158
Simulação dinâmica do desempenho energético de um envidraçado termocrómico nos principais climas da Europa.....	166
Evolução do método ARICA:2019 - ARICA:2022.....	175
Perfil tendencial de comportamento dos ocupantes em caso de incêndio	183
Literature review on the contribution of energy retrofitting of existing residential building stock to achieve energy sustainability: the case of Jordan	195
Análise de normativas de incêndio em BIM por verificação automática de regras	207
Análise da otimização do desempenho energético na reabilitação: O caso de um edifício em granito, em Pinhel.....	214
Risco de Incêndio Georreferenciado do Centro Histórico de Viana do Castelo	227
Otimização de Envidraçados Termocrómicos para um Clima Mediterrânico.....	239
Impacto de estratégias de aquecimento nos sistemas de construção LSF: avaliação do conforto térmico e desempenho energético.....	249

CAPÍTULO 3.....	258
TECNOLOGIAS CONSTRUTIVAS.....	258
Propriedades de betão drenante em misturas com agregados reciclados	259
Sistemas de Construção Modular Adaptado para Ambientes Construídos Saudáveis	272
Armazenamento de energia: simulação numa unidade habitacional	280
Impressão 3D de Edifícios.....	292
Isolamento Térmico pelo Interior de Piscinas – Ensaio Laboratoriais	304
Telha de Concreto: Adição de fibra derivada de bagaço de cana-de-açúcar	313
Incorporação de fibras híbridas de nylon e polipropileno em argamassas de revestimento.....	325
Pavimentos mistos em aço e betão concebidos com vigas metálicas em aço enformado a frio...	338
Durabilidade de Estruturas Mistas em Aço-Betão Coladas.....	348
Comportamento físico de janelas em fibra de vidro	359
Situação e potencial das alvenarias em Portugal perante o contexto internacional.....	368
Ligações de Madeira Resistentes a Momento	377

CAPÍTULO 1

MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

Placas sustentáveis à base de argamassas de cimento com incorporação direta de PCM

CUNHA Sandra^{1, a}, AGUIAR Ingrid^{1, b} e AGUIAR José^{1, c}

¹Centro Território, Ambiente e Construção, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho

Campus de Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal

^asandracunha@civil.uminho.pt, ^bingried.aguiar@hotmail.com, ^caguiar@civil.uminho.pt

Palavras-chave: Argamassas, Placas, Materiais de Mudança de Fase, Sustentabilidade.

Resumo. Atualmente, é necessário dar um novo rumo ao setor da construção civil, tornando-se imprescindível alterar a forma como os edifícios são construídos e reabilitados, com o objetivo de obter uma construção mais sustentável. Cada vez mais é importante minimizar os elevados consumos energéticos dos edifícios durante a sua vida útil, tirando partido de fontes de energia renováveis, como a energia solar. Os materiais de mudança de fase (PCM) podem reduzir o consumo energético dos edifícios devido à sua capacidade de armazenamento térmico. A utilização de PCM em materiais de construção possui benefícios sociais, ambientais e económicos relacionados com o aumento do conforto térmico, diminuição do consumo de energia de fontes não renováveis e diminuição das necessidades e custos de climatização. O desenvolvimento de placas sustentáveis à base de argamassas de cimento com incorporação direta de PCM constitui uma nova opção para a melhoria da eficiência energética dos edifícios em operações de reabilitação e construções novas. Neste trabalho, inicialmente foram estudadas as principais propriedades das argamassas com incorporação direta de PCM, com base no seu comportamento físico, mecânico e térmico. Posteriormente, foram desenvolvidas placas à base destas argamassas e testadas quanto às suas principais propriedades físicas e mecânicas. A realização deste trabalho permitiu concluir que a incorporação de PCM em argamassas e placas altera as suas propriedades do ponto de vista físico, mecânico e térmico. Em relação à caracterização das argamassas, foi possível verificar que a inclusão de PCM originou uma diminuição da resistência à flexão e compressão, diminuição da temperatura máxima e aumento da temperatura mínima para a estação de verão e primavera. No que confere à caracterização das placas verificou-se que a incorporação de PCM originou um aumento da sua macroporosidade e diminuição da resistência à flexão.

Introdução

Atualmente, a Europa enfrenta graves problemas relacionados com o consumo de energia, agravados pelos recentes conflitos internacionais em países produtores e exportadores de gás natural e petróleo. Assim, cada vez mais a União Europeia necessita de encontrar formas de se tornar mais independente em termos energéticos. Desta forma, investir em energia renovável pode ser uma forma de minimizar essa dependência energética. Por outro lado, apostar em materiais de construção funcionais, nomeadamente materiais de construção com capacidade de armazenamento térmico, pode também contribuir para aumentar o conforto energético nos edifícios residenciais e de serviços.

Na Europa, o consumo final de energia é essencialmente baseado em petróleo bruto e energia elétrica. Em Portugal cerca de 42% do consumo de energia é baseado em petróleo bruto e produtos petrolíferos, 26,7% em energia elétrica, 19,5% em energias renováveis, 11,7% em gás e 0,1% em combustíveis sólidos [1]. Nos últimos anos, entre 2000 e 2020, verificou-se um aumento da utilização de energias renováveis em todos os países da União Europeia. A Alemanha, França e Itália são os países com maior taxa de utilização de energia proveniente de fontes renováveis. Em

Portugal, no mesmo período verificou-se um aumento da utilização de fontes de energia renováveis de cerca de 24%, fruto de várias medidas de incentivo criadas pelas autoridades governamentais [1].

Grande parte da energia renovável produzida na Europa encontra-se associada à biomassa e resíduos, cerca de 57%, sendo que a utilização de energia solar representa apenas cerca de 7%. Em Portugal, a produção de energia renovável com base em biomassa e resíduos é ligeiramente inferior, cerca de 51%, enquanto a energia solar é ligeiramente superior, cerca de 11%. A disponibilidade de energia solar é imensa, sendo que a cada ano a energia fornecida pelo sol que atinge toda a superfície terrestre é cerca de 10.000 vezes superior ao consumo atual de energia por ano em todo o mundo [2]. Assim, torna-se necessário não só aumentar o recurso a fontes de energia renováveis, mas também aumentar especificamente o recurso à energia solar.

Os materiais de mudança de fase (PCM) têm vindo a ser estudados para aplicações em edifícios devido à sua capacidade de armazenamento térmico, com base na energia solar. Várias soluções têm sido desenvolvidas para diferentes elementos construtivos, tais como paredes [3-7], pavimentos [8-11] e tetos [12-14].

A incorporação de PCM em materiais de construção pode ser realizada através de diferentes técnicas [15] tais como o encapsulamento (microencapsulamento [3, 6, 16-18] e macroencapsulamento [5, 7, 19-20]), imersão [21-22], estabilização [23] e incorporação direta [24]. O encapsulamento tem sido a técnica de incorporação de PCM mais utilizada nos edifícios [15], no entanto acarreta um custo de produção significativamente superior quando comparado à incorporação direta, que permite a utilização do PCM sem necessidade de tratamento prévio [24].

O principal objetivo deste trabalho consistiu em desenvolver e caracterizar argamassas e placas de revestimento interior com incorporação direta de PCM. A composição das placas foi baseada na composição das argamassas previamente desenvolvida. Foram desenvolvidas quatro composições distintas com diferentes teores de PCM (0%, 5%, 10% e 20%). O comportamento das argamassas foi avaliado, no estado fresco e endurecido, com base na trabalhabilidade, desempenho mecânico e desempenho térmico. O comportamento das placas foi avaliado no estado endurecido, com base no volume de poros abertos, massa volúmica real e aparente, porosidade total, absorção de água por imersão, absorção de água por capilaridade e resistência à flexão.

Campanha experimental

Materiais. O cimento utilizado foi o CEM II/B-L 32,5 N com uma massa volúmica de 3030 kg/m³. As cinzas volantes utilizadas foram produzidas numa central termoelétrica portuguesa a carvão e apresentaram uma massa volúmica de 2420 kg/m³.

O agregado utilizado foi composto por dois tipos diferentes de areia (A e B). A areia A possui uma dimensão mínima de 0,125 mm e dimensão máxima de 0,5 mm, apresentando um tamanho médio de partícula de 439,9 µm e massa volúmica de 2600 kg/m³. A areia B é constituída por partículas com dimensão mínima de 0,125 mm e dimensão máxima de 8 mm, apresentando um tamanho médio de partícula de 762 µm e massa volúmica de 2569 kg/m³.

O PCM utilizado é não encapsulado, de natureza orgânica, composto por uma parafina com transição de temperatura compreendida entre 20°C e 23°C, entalpia de 200 kJ/kg, massa volúmica no estado sólido de 760 kg/m³ e massa volúmica no estado líquido de 700 kg/m³.

Procedimentos de ensaio. No que diz respeito às argamassas aditivadas com PCM não encapsulado, estas foram avaliadas tendo em consideração o seu desempenho físico, mecânico e térmico. O seu comportamento físico foi baseado na trabalhabilidade. O seu comportamento mecânico foi baseado na resistência à flexão e resistência à compressão. Por último, o seu desempenho térmico foi avaliado com base na influência do PCM na temperatura máxima e mínima, simulada em câmara climática. A trabalhabilidade das argamassas foi determinada com base no método da mesa de espalhamento de acordo com a especificação europeia EN 1015-3 [25]. O valor resultante do ensaio apenas foi considerado quando compreendido entre 170 e 180 mm. A resistência à flexão e compressão foram determinadas com base na especificação europeia EN 1015-11 [26], sendo que os ensaios foram realizados com controle de carga a uma velocidade de 50 N/s e 150 N/s, respetivamente. Por último, o comportamento térmico foi avaliado com recurso a

uma câmara climática. Para cada composição em estudo foi construída uma célula de teste em pequena escala com dimensões de 200×200×200 mm³ com recurso a um material isolante (XPS) e equipada com um termopar. As argamassas foram aplicadas no interior da célula de teste revestindo todas as superfícies. Cada célula de teste foi colocada no interior da câmara climática, sendo posteriormente simulada a estação de verão e primavera, com base em dados meteorológicos recolhidos numa estação meteorológica instalada no campus da Universidade do Minho em Guimarães. O estudo da estação de verão foi baseado numa lei de temperatura compreendida entre 11°C e 44°C. Para a estação de primavera, a lei de temperatura utilizada foi entre 12°C e 29°C.

Relativamente à caracterização das placas aditivadas com PCM, estas foram avaliadas tendo em conta o seu comportamento físico e mecânico. Tendo em consideração a ausência de normas harmonizadas específicas para este tipo de material, decidiu-se adaptar as normas para placas de pedra natural. O comportamento físico foi baseado na massa volúmica real e aparente, porosidade total e aberta e absorção de água por capilaridade e imersão. O comportamento mecânico foi baseado na resistência à flexão. A determinação do volume de poros abertos, massa volúmica real e aparente e porosidade total foi realizada de acordo com a especificação NP EN 1936 [27]. A determinação da massa volúmica real e da porosidade total foi realizada de acordo com o método Le Chatelier, descrito na especificação NP EN 1936 [27]. A absorção de água por imersão foi realizada de acordo com a especificação NP EN 13755 [28] e a absorção de água por capilaridade foi determinada de acordo com a NP EN 1925 [29]. Por último, o comportamento em flexão das placas aditivadas com PCM foi determinado com base na especificação NP EN 12372 [30] com controle de carga e a uma velocidade de 50 N/s.

Provetes, protótipo das placas e condições de cura. A determinação da resistência à flexão e à compressão das argamassas foi realizada utilizando 3 provetes prismáticos com dimensões de 40×40×160 mm³.

A determinação da geometria e dimensão do protótipo das placas aditivadas com PCM, foi realizada com base numa pesquisa de mercado, tendo sido possível verificar uma grande disponibilidade de placas de pedra natural e compósitos com diferentes dimensões adequadas às mais variadas necessidades de projeto. Desta forma, optou-se por seguir as indicações geométricas previstas na especificação NP EN 12372 [30], considerando uma geometria que permita o seu fácil manuseio e produção industrial, sendo selecionada uma geometria prismática com dimensões de 100×100×20 mm³.

A determinação do volume de poros abertos, massa volúmica real e aparente, porosidade total e aberta e resistência à flexão das placas, foi obtida com base em 5 provetes prismáticos com dimensões reais de 100×100×20 mm³. A absorção de água por imersão à pressão atmosférica e a absorção de água por capilaridade foram determinadas utilizando 6 provetes cúbicos com dimensões de 50×50×50 mm³.

Após a sua preparação, todos os provetes e placas protótipo foram armazenadas durante 7 dias em sacos de polietileno, sendo posteriormente colocadas em ambiente de laboratório com temperatura controlada de 20°C e humidade relativa de 65%, durante 21 dias.

Composições. O desenvolvimento destas composições teve em conta trabalhos anteriores [31-33]. Foram desenvolvidas quatro composições distintas de argamassas à base de cimento com incorporação de diferentes teores de PCM não encapsulado (Tabela 1). Tendo sido produzida uma argamassa de referência, sem incorporação de PCM (C0PCM) e uma argamassa com um teor de incorporação de 5% PCM (C5PCM), 10% PCM (C10PCM) e 20% PCM (C20PCM) em relação à massa de agregado. A quantidade de ligante utilizada foi de 500 kg/m³, sendo constituído por 40% cimento e 60% de cinzas volantes. O agregado foi constituído por 50% de Areia A e 50% de Areia B.

Tabela 1: Composição das argamassas (kg/m³)

Composição	Cimento	Cinza Volante	Areia A	Areia B	PCM	Água
C0PCM	200	300	684.9	684.9	0	280
C5PCM	200	300	583.6	583.6	58.4	275
C10PCM	200	300	519.1	519.1	103.8	260
C20PCM	200	300	423.7	423.7	169.5	240

Caracterização das argamassas

Trabalhabilidade. De acordo com a Figura 1 observou-se uma diminuição da relação água/ligante com a incorporação de um maior teor de PCM nas argamassas, sendo que a incorporação de 5%, 10% e 20% de PCM originou uma diminuição na quantidade de água das argamassas em cerca de 2%, 7% e 14%, respectivamente. O comportamento identificado pode ser justificado pelo fato do PCM ser incorporado no estado líquido nas argamassas. Assim, o PCM funciona como um agente para a formação de uma argamassa homogênea, mesmo sem contribuir para o processo de hidratação do ligante.

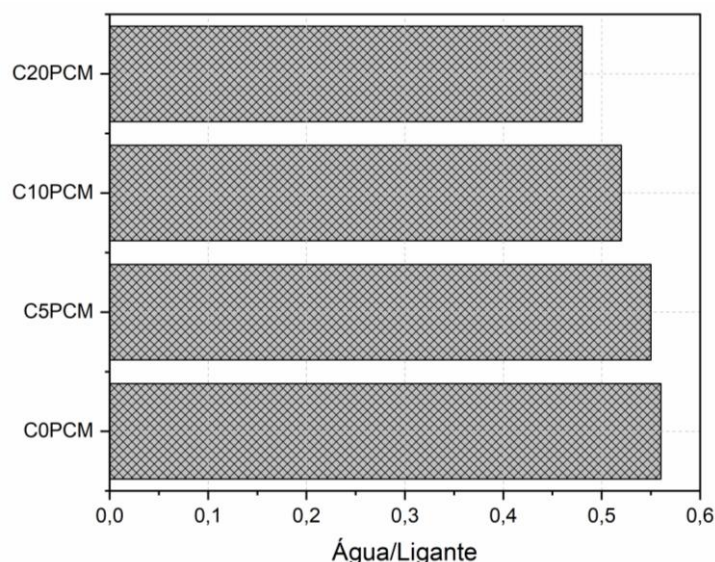


Figura 2: Relação água/ligante das argamassas.

Resistência à flexão e compressão A Figura 2 apresenta o comportamento em flexão e compressão das argamassas com incorporação direta de PCM, tendo sido possível observar que a incorporação de PCM provocou uma diminuição no desempenho mecânico das argamassas. Relativamente à resistência à flexão, foi possível verificar uma diminuição de cerca de 27% no seu valor com a incorporação de 5% de PCM não encapsulado. No que diz respeito à resistência à compressão, o decréscimo observado foi de cerca de 26%. Este comportamento pode ser explicado pelo aumento da relação líquido/ligante das argamassas, o que provoca um aumento da porosidade e consequente diminuição das resistências à flexão e à compressão [31]. Este aumento da porosidade também pode ser demonstrado pelo aumento do volume de poros abertos, porosidade total e absorção de água por imersão, observado para as placas com incorporação de PCM e descrito na seção seguinte deste trabalho. Por outro lado, a incorporação de um PCM não encapsulado também pode afetar o processo de cura das argamassas à base de cimento, causando um atraso no processo de hidratação do ligante, o que novamente justifica a perda no desempenho mecânico verificada [24, 32].

Temperatura máxima e mínima. A Figura 3 permite observar a influência da incorporação de PCM nas temperaturas extremas durante a simulação da estação de verão e primavera, tendo sido possível observar uma menor temperatura máxima e maior temperatura mínima associada às células de testes revestidas com argamassas aditivadas com PCM. Verificou-se também que a presença de um maior teor de PCM originou um melhor desempenho térmico, devido a uma diminuição mais expressiva da temperatura máxima e um aumento mais significativo da temperatura mínima. No que diz respeito à estação de verão a incorporação de 20% de PCM não encapsulado provocou uma diminuição da temperatura máxima em cerca de 8% e um aumento da temperatura mínima em cerca de 2%. Na estação de primavera verificou-se uma diminuição da temperatura máxima em cerca de 8% e um aumento da temperatura mínima em cerca de 8%, com a incorporação de 20% de PCM não encapsulado.

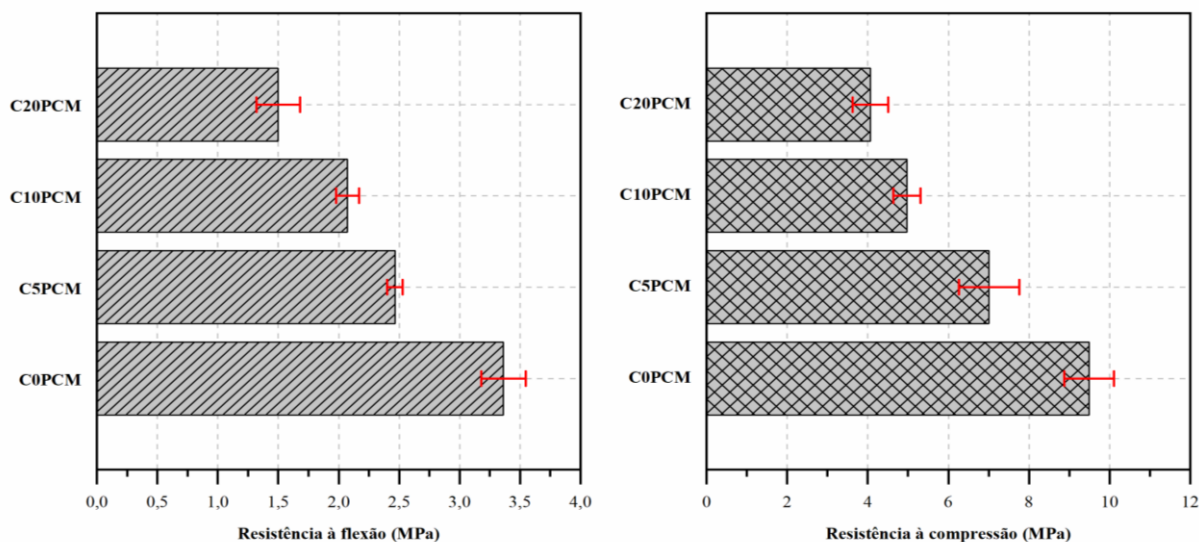


Figura 2: Resistência à flexão e compressão das argamassas.

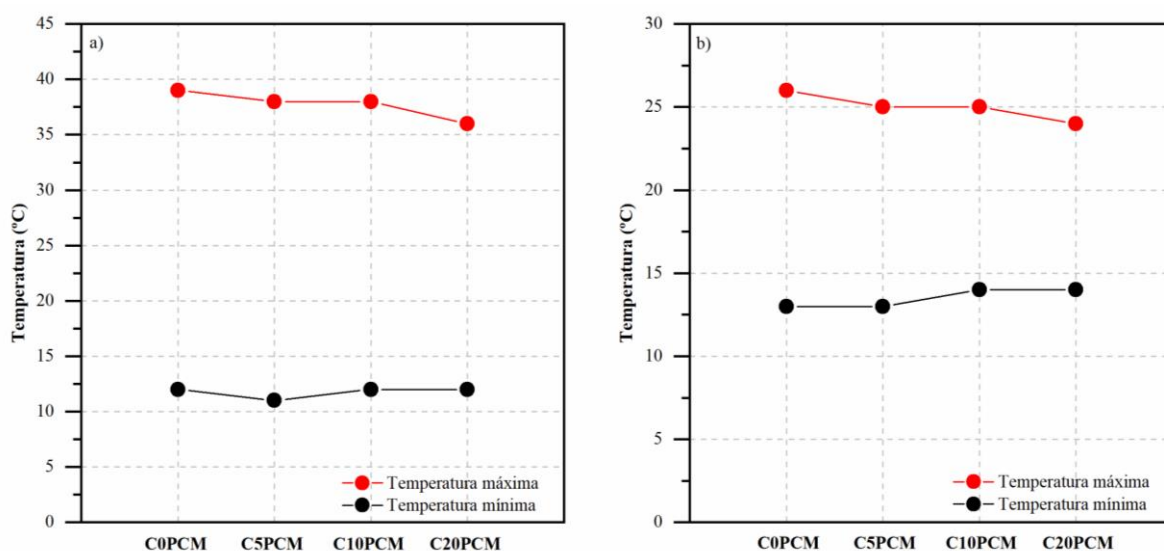


Figura 3: Temperatura máxima e mínima: a) Estação de verão; b) Estação de primavera.

Caracterização das placas

Volume de poros abertos. A Figura 4 revela que o volume de poros abertos aumenta com a presença de um maior teor de PCM. Comparando com as placas de referência, ou seja, sem incorporação de PCM, foi possível verificar que a incorporação de 5% de PCM originou um aumento no volume de poros abertos superior a 30%. Esse comportamento pode ser justificado pela geometria do protótipo das placas, que apresentam uma maior superfície exposta, permitindo maior facilidade de evaporação da água durante o processo de cura. Por outro lado, o PCM tem uma maior tendência a se deslocar para a superfície, o que também contribui para um aumento do volume de poros abertos, pois neste caso o PCM pode se deslocar do local onde foi aplicado, porém essa quantidade de PCM não é significativa. Este efeito pode ser chamado de “efeito de placa”.

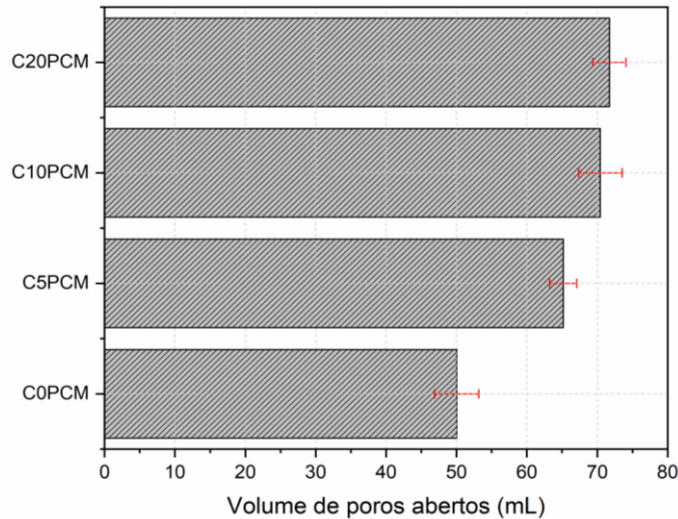


Figura 4: Volume de poros abertos das placas.

Massa volúmica real e aparente. Em relação à massa volúmica aparente e real (Tabela 2), foi possível verificar uma diminuição, com a incorporação de um maior teor de PCM nas argamassas. Relativamente à massa volúmica aparente, observou-se uma diminuição do seu valor superior a 11% com a incorporação de 5% de PCM, em comparação às placas de referência. Em relação à massa volúmica real observou-se que a diminuição registada não foi tão significativa, apenas cerca de 5%. É de notar que o comportamento observado para a massa volúmica aparente é influenciado pelo volume de poros abertos (Figura 4), sendo que quanto maior for este valor, menor será a massa volúmica aparente. Por outro lado, a diminuição da massa volúmica real é justificada pela menor massa volúmica do PCM, em comparação com a massa volúmica da areia utilizada. É também de salientar que a diminuição da relação água-ligante das argamassas (Figura 1) também contribuiu para os comportamentos descritos.

Tabela 2: Massa volúmica aparente e real das placas (kg/m^3)

Composição	Massa volúmica aparente	Massa volúmica real
C0PCM	1985.3	2294.8
C5PCM	1763.9	2203.9
C10PCM	1698.4	2183.5
C20PCM	1626.3	2158.9

Porosidade total. A Figura 5 apresenta a porosidade total das placas com incorporação de PCM, podendo-se observar que a porosidade total aumenta com a incorporação de PCM. Efetuando uma comparação entre a placa sem incorporação de PCM (0% PCM) e a placa com 5% de incorporação de PCM, observou-se um aumento na porosidade total de 48%, sendo de 65% e 76% para uma incorporação de 10% de PCM e 20% de PCM, respetivamente. Este comportamento pode ser explicado pela maior facilidade de evaporação da água, devido à maior superfície exposta das placas, o que se encontra relacionado com o “efeito de placa” anteriormente descrito, afetando principalmente a macroporosidade das placas.

Absorção de água. A absorção de água das placas desenvolvidas foi avaliada com base na absorção de água por capilaridade e imersão.

Relativamente à absorção de água por imersão (Figura 6) foi possível observar um aumento da mesma com a presença de um maior teor de PCM, sendo que a incorporação de 5%, 10% e 20% de PCM resultou num aumento na absorção de água por imersão de cerca de 3%, 7% e 21%, respetivamente. Este comportamento pode ser atribuído ao aumento da relação líquido/ligante nas argamassas que originaram as placas (Figura 1) e também pelo aumento do volume de poros abertos (Figura 4) e da porosidade total (Figura 5) nas placas com incorporação de PCM, o que consequentemente se encontra associado à presença de uma maior macroporosidade.

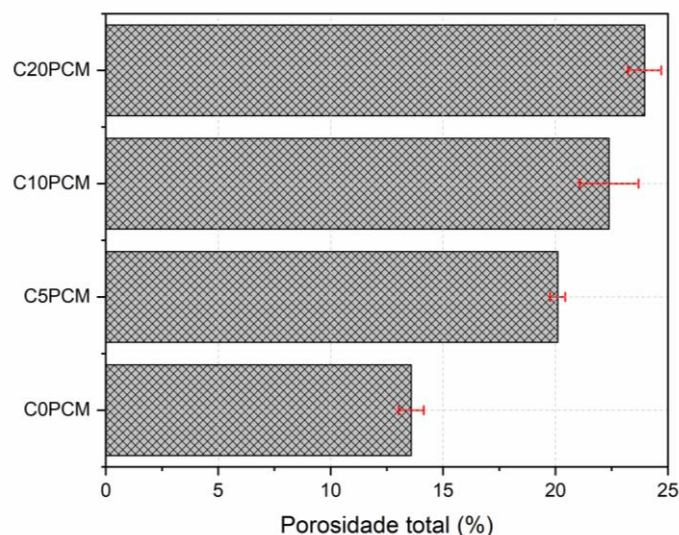


Figura 5: Porosidade total das placas.

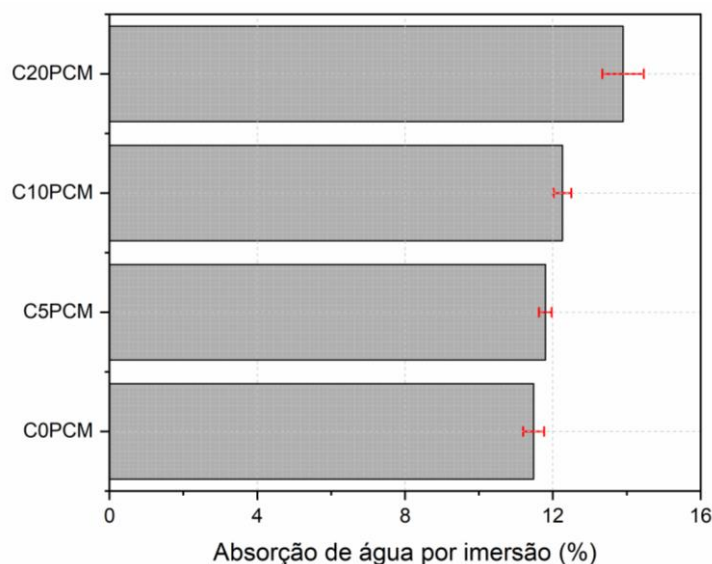


Figura 6: Absorção de água por imersão das placas.

A absorção de água por capilaridade permite obter informações sobre a microporosidade das placas. A Figura 7 apresenta o coeficiente de absorção de água por capilaridade das placas desenvolvidas. Foi possível observar um coeficiente de absorção de água por capilaridade semelhante para as placas com incorporação de 5% e 10% de PCM. No entanto, para uma incorporação de 20% de PCM, verificou-se uma diminuição de cerca de 25%. Relativamente à quantidade de água absorvida por capilaridade (Figura 8), mais uma vez pode-se observar que a incorporação de um maior teor de PCM conduziu a uma menor absorção de água. Este comportamento pode ser explicado pela existência de uma microestrutura mais compacta das argamassas e placas com incorporação de PCM, o que leva a uma diminuição da microporosidade das argamassas [32].

Resistência à flexão. De acordo com a Figura 9 foi possível observar uma diminuição na resistência à flexão das placas com a incorporação de PCM. A incorporação de 5% de PCM originou uma diminuição da resistência à flexão superior a 15%. Este comportamento pode ser justificado pelo aumento da quantidade de líquido presente nas argamassas que originaram as placas (Figura 1) e maior macroporosidade (Figura 5 e 6), proporcionada pela maior facilidade de evaporação da água devido ao efeito de placa, já descrito ao longo deste trabalho.

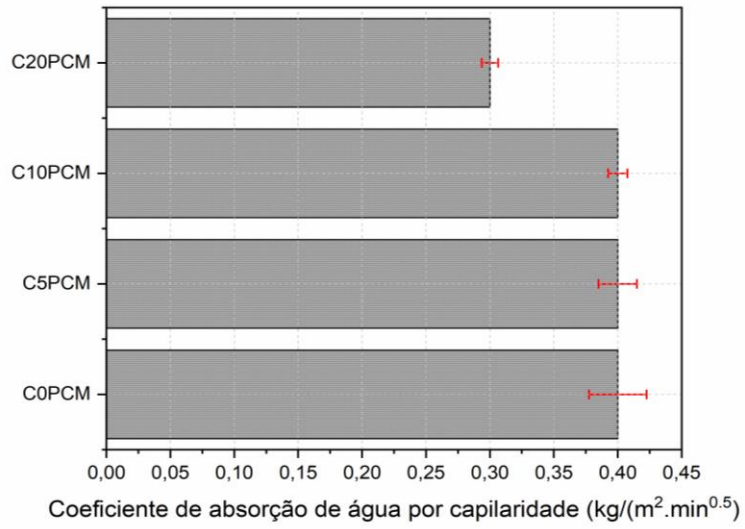


Figura 7: Coeficiente de absorção de água por capilaridade das placas.

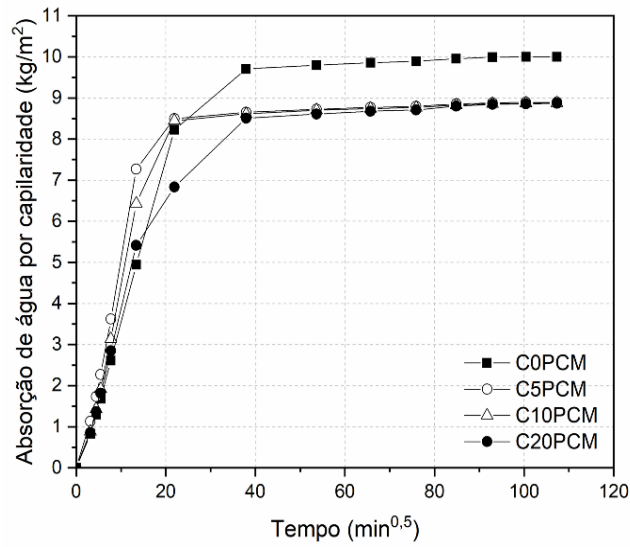


Figura 8: Absorção de água por capilaridade das placas.

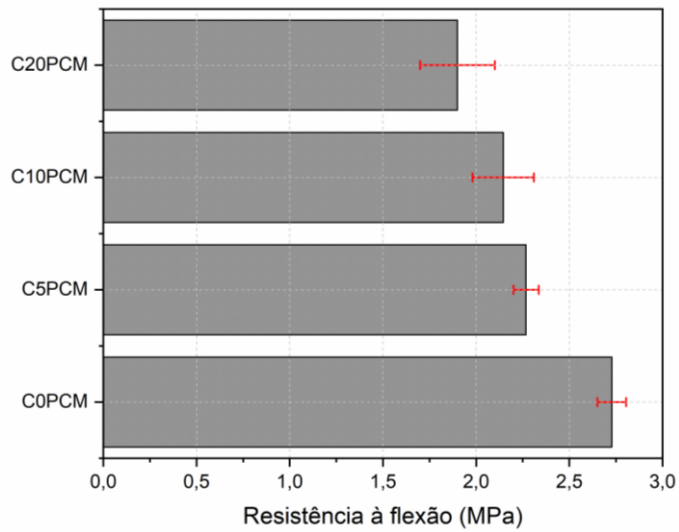


Figura 9: Resistência à flexão das placas.

Conclusão

Este estudo demonstra que é possível utilizar argamassas com incorporação de material de mudança de fase não encapsulado para a produção de placas. Contudo, a incorporação de PCM não encapsulado em argamassas e placas altera as suas propriedades do ponto de vista físico, mecânico e térmico.

Relativamente ao estudo das argamassas foi possível identificar os seguintes aspetos:

- A relação água/ligante diminui com a incorporação de um maior teor de PCM, devido ao fato deste material ser incorporado no estado líquido;

- A resistência à flexão e à compressão revelaram uma diminuição do seu valor com a incorporação de PCM, o que pode ser explicado pelo aumento da relação líquido/ligante, que provoca um aumento da macroporosidade das argamassas.

- A presença de PCM nas argamassas influencia as temperaturas extremas, observando-se uma diminuição da temperatura máxima e um aumento da temperatura mínima, tanto na estação de verão como na estação de primavera, sendo que as argamassas com maior teor de PCM apresentam um melhor desempenho. Este comportamento encontra-se diretamente relacionado com uma maior economia no consumo de energia elétrica nos edifícios que possuam esta tecnologia.

No que diz respeito à caracterização das placas foi possível observar os seguintes aspetos:

- O volume dos poros abertos, a porosidade total e a absorção de água por imersão revelam uma diminuição com a incorporação de um maior teor de PCM. Este comportamento pode ser justificado pela geometria da placa, uma vez que a superfície exposta durante o processo de cura é maior do que a superfície exposta nos provetes de argamassa, facilitando a evaporação da água não combinada quimicamente, efeito denominado como “efeito placa”.

- A massa volúmica aparente e real sofreram uma diminuição do seu valor com a incorporação de PCM, o que pode ser justificado pela maior macroporosidade das placas, causada pela presença do PCM e pelo “efeito placa”.

- A absorção de água por capilaridade diminuiu com a incorporação de PCM, devido à existência de uma microestrutura mais compacta das argamassas de PCM, no que diz respeito aos poros de menores dimensões.

- A resistência à flexão diminuiu com a incorporação de PCM não encapsulado, sendo que este comportamento encontra-se associado ao aumento da relação líquido/ligante nas argamassas e à maior macroporosidade causada pelo “efeito placa” descrito neste estudo.

Em suma, o comportamento das placas com incorporação de PCM é largamente influenciado pelas propriedades das argamassas que lhe dão origem. No entanto, em termos de comportamento mecânico, o desempenho das placas não foi afetado pela sua geometria, o que comprova que as dimensões selecionadas constituem uma possível solução para a pré-fabricação de materiais de construção obtidos com base em argamassas funcionais.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por Fundos Nacionais através da FCT/MCTES – Fundação para a Ciência e Tecnologia/Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, no âmbito do CTAC – Centro de Território, Ambiente e Construção – UIDB/0407/2020.

Referências

- [1] Pordata, <https://www.pordata.pt/Europa>, em 26/09/2022.
- [2] G. Blengini and T. Carlo, *The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the LCA of low energy buildings*, Energy and Buildings, 42 (2010) 869-880.
- [3] S. Cunha, J. B. Aguiar and A. Tadeu, *Thermal performance and cost analysis of PCM mortars based in different binders*, Construction and Building Materials, 122 (2016) 637-648.

- [4] M. Kheradmand, M. Azenha, J. B. Aguiar and J. Castro-Gomes, *Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behaviour of buildings*, Energy, 94 (2016) 250-261.
- [5] T. Santos, M. Kolokotroni, N. Hopper and K. Yearley, *Experimental study on the performance of a new encapsulation panel for PCM's to be used in the PCM-Air heat exchanger*, Energy Procedia, 161 (2019) 352-359.
- [6] M. Bahrar, Z. Djamai, M. Mankibi, A. Larbi and M. Salvia, *Numerical and experimental study on the use of microencapsulated phase change materials (PCMs) in textile reinforced concrete panels for energy storage*, Sustainable Cities and Society, 41 (2018) 455-468.
- [7] R. Saxena, D. Rakshit and S. Kaushik, *Phase change material (PCM) incorporated bricks for energy conservation in composite climate: A sustainable building solution*, Solar Energy, 183 (2019) 276-284.
- [8] G. Zhou and J. He, *Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage materials and heating pipes*, Applied Energy, 138 (2015) 648-660.
- [9] W. Cheng, B. Xie, R. Zhang, Z. Xu and Y. Xia, *Effect of thermal conductivities of shape stabilized PCM on under-floor heating system*, Applied Energy, 144 (2015) 10-18.
- [10] A. Entrop, H. Brouwers and A. Reinders, *Experimental research on the use of micro-encapsulated Phase Change Materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses*, Solar Energy, 85 (2011) 1007-1020.
- [11] X. Jin and X. Zhang, *Thermal analysis of a double layer phase change material floor*, Applied Thermal Engineering, 31 (2011) 1576-1581.
- [12] H. Weinläder, W. Körner and B. Strieder, *A ventilated cooling ceiling with integrated latent heat storage-Monitoring results*, Energy and Buildings, 82 (2014) 65-72.
- [13] M. J. Abden, Z. Tao, Z. Pan, L. George and R. Wuhrer, *Inclusion of methyl stearate/diatomite composite in gypsum board ceiling for building energy conservation*, Applied Energy, 259 (2020) e114113.
- [14] S. Lu, B. Liang, X. Li, X. Kong, W. Jia and L. Wang, *Performance Analysis of PCM Ceiling Coupling with Earth-Air Heat Exchanger for Building Cooling*, Materials, 13 (2020) e2890.
- [15] S. Cunha and J. B. Aguiar, *Phase Change Materials and Energy Efficiency of Buildings: A Review of Knowledge*, Journal of Energy Storage, 27 (2020) e101083.
- [16] F. Kuznik, J. Virgone and J. Roux, *Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-scale experimental investigation*, Energy and Buildings, 40 (2008) 148-156.
- [17] M. Bake, A. Shukla and S. Liu, *Development of gypsum plasterboard embodied with microencapsulated phase change material for energy efficient buildings*, Materials Science and Technology, 4 (2021) 166-176.
- [18] O. Gencel, A. Ustaoglu, A.t Benli, G. Hekimoglu, A. Sarı, E. Erdogmus, M. Sutcu, G. Kaplan and O. Y. Bayraktar, *Investigation of physico-mechanical, thermal properties and solar thermoregulation performance of shape-stable attapulgite based composite phase change material in foam concrete*, Solar Energy, 236 (2022) 51-62.
- [19] M. Ahmad, A. Bontemps, H. Sallée and D. Quenard, *Thermal Testing and Numerical Simulation of a Prototype Cell Using Light Wallboards Coupling Vacuum Isolation Panels and Phase Change Material*, Energy and Buildings, 38 (2006) 673-681.

- [20] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez and L.F. Cabeza, *Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling*, Energy and Buildings, 42 (2010) 534-540.
- [21] L. Shilei, Z. Neng and F. Guohui, *Impact of Phase Change Wall Room on Indoor Thermal Environment in winter*, Energy and Buildings, 38 (2006) 18-24.
- [22] L. Shilei, F. Guohui, Z. Neng and D. Li, *Experimental study and evaluation of latent heat storage in phase change materials wallboards*, Energy and Buildings, 39 (2007) 1088-1091.
- [23] K. Lin, Y. Zhang, X. Xu, H. Di, R. Yang and P. Qin, *Experimental Study of Under-Floor Electric Heating System with Shape-Stabilized PCM Plates*, Energy and Buildings, 37 (2005) 215-220.
- [24] S. Cunha, M. Lima and J. B. Aguiar, *Influence of adding phase change materials on the physical and mechanical properties of cement mortars*, Construction and Building Materials, 127 (2016) 1-10.
- [25] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-3, Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), (1999).
- [26] European Committee for Standardization (CEN), EN 1015-11, Methods of Test for Mortar for Masonry – Part 11: Determination of Flexural and Compressive Strength of Hardened Mortar, (1999).
- [27] Instituto Português da Qualidade (IPQ), NP EN 1936, Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da massa volúmica real e aparente e da porosidade total e aberta, (2008).
- [28] Instituto Português da Qualidade (IPQ), NP EN 13755, Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da absorção de água à pressão atmosférica, (2008).
- [29] Instituto Português da Qualidade (IPQ), NP EN 1925, Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação do coeficiente de absorção de água por capilaridade, (2000).
- [30] Instituto Português da Qualidade (IPQ), NP EN 12372, Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à flexão sob carga centrada, (2008).
- [31] S. Cunha, P. Leite and J. B. Aguiar, *Characterization of innovative mortars with direct incorporation of phase change materials*, Journal of Energy Storage, 30 (2020) e101439.
- [32] S. Cunha, M. Silva and J. B. Aguiar, *Behavior of cementitious mortars with direct incorporation of non-encapsulated phase change material after severe temperature exposure*, Construction and Building Materials, 230 (2020) e117011.
- [33] S. Cunha, J. B. Aguiar and V. Ferreira, *Eco-efficient mortars with incorporation of Phase Change Materials*, Journal of Building Physics, 41 (2018) 469-492.

Durability in hygrothermal environments of GFRP composites produced by vacuum infusion. Preliminary results of an experimental study

HASAN Tarikul^{1a}, CORREIA João R.^{1b}, GARRIDO M.^{1c},
CABRAL-FONSECA S.^{2d}, SILVA Beatriz T.^{1e} e SENA-CRUZ José^{3f}

¹CERIS, Instituto Superior Técnico,
Universidade de Lisboa. IST-DECivil, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa

²Departamento de Materiais, Núcleo de Materiais Orgânicos,
Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa

³Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering (ISISE) /
Institute of Science and Innovation for Bio-Sustainability (IB-S),
University of Minho, Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

^atarikul.hasan@tecnico.ulisboa.pt, ^bjoao.ramoa.correia@tecnico.ulisboa.pt,
^cmario.garrido@tecnico.ulisboa.pt, ^dsbravo@lnec.pt, ^ebeatriz.tavares.silva@tecnico.ulisboa.pt,
^fjsena@civil.uminho.pt

Keywords: Vacuum Infusion, Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Composites, Thermomechanical and Mechanical Properties, Hygrothermal Aging, Degradation.

Abstract. Despite having many advantages over conventional materials, fiber reinforced polymer (FRP) composites are still not widely used in construction. Among other reasons, this is explained by the scatter and somewhat inconsistent durability data available for these materials, which also explains the lack of robust and validated degradation models for design. These limitations are particularly relevant for relatively thick laminates produced by vacuum infusion. This paper presents preliminary results of an ongoing research project that aims to contribute to bridge the above-mentioned gaps. One of the main objectives of the project is to analyze and simulate the effects of hygrothermal degradation on the thermomechanical and mechanical properties of glass fiber reinforced polymer (GFRP) composites, produced by vacuum infusion, with vinyl ester and unsaturated polyester resins. In the present study, this type of GFRP laminates, with nominal thickness of 6.5 mm, are immersed in water at three temperatures (20 °C, 40 °C and 60 °C) and, after predetermined periods (up to 20 years), the degradation of their thermomechanical and mechanical properties is evaluated through different tests: DMA, tensile, compressive, flexure, in-plane shear and interlaminar shear. This paper presents the results obtained (i) in the initial characterization tests, and (ii) after 3 and 6 months of hygrothermal aging – the data presented allow a first comparative assessment of the durability performance of the vacuum-infused GFRP laminates produced with those two types of resins.

Introduction

Fibre reinforced polymer (FRP) composites can provide significant advantages over traditional construction materials, such as non-corrodibility, lightness, high specific strength, and stiffness. In the last three decades, together with the durability problems experienced by traditional materials, the high costs associated with the rehabilitation of civil engineering structures has promoted the use of FRP composites [1,2], which have a long track of use in various industries where they are typically subjected to severe environmental conditions. In spite of their relatively good durability performance, FRP composites were shown to be susceptible to degradation when they are subjected to different environmental agents, such as moisture [3] and chemicals [4]; thermal effects [5], including thermal [6] and freeze-thaw cycles [7]; and UV radiation [8].

In service conditions, construction materials are often exposed to moisture at different temperatures. Therefore, this type of exposure may significantly affect the performance of FRP

composites, with such effects depending, among other aspects, on the temperature and duration of exposure [3]. This happens in two different ways: physical degradation and chemical degradation. Physical degradation occurs in the form of swelling, plasticization, and relaxation, which are typically reversible mechanisms; chemical degradation occurs as hydrolysis, which is irreversible [9,10]. Moisture can also diffuse into the fibre-matrix interphase, causing fibre-matrix debonding; all these degradation mechanisms decrease the thermomechanical and mechanical properties of FRP composites [11].

Several studies have been done on the durability of FRP composites; however, many gaps still exist in the literature: (i) studied FRP laminates are usually much thinner (typically < 4-5 mm) than those required for civil structural applications; (ii) little data is available on FRPs produced by vacuum-infusion (relevant in construction); (iii) only a few studies provide a direct comparison of alternative resin systems; besides, there is a significant lack of (iv) comprehensive and validated data about the durability of FRPs, namely those used in civil engineering; (v) robust and validated degradation models; (vi) reliable guidelines for the durability design of FRP structures, and (vii) comparison between accelerated laboratory-based ageing and natural (environmental) ageing is very seldom available for FRPs produced by vacuum-infusion. Hence, paradoxically, durability is hampering the widespread use of FRPs. These issues should be addressed to fully utilize the potential of FRP composites, and the first step in that path is to properly and systematically measure the degradation of FRP composites exposed to different ageing conditions.

This paper presents the initial results of an ongoing experimental study about the hygrothermal degradation of the thermomechanical and mechanical properties of relatively thick (6.5 mm) glass-FRP (GFRP) composites produced by vacuum infusion. Composites produced with vinyl ester (VE) and unsaturated polyester (UP) resins were immersed in water at three temperatures (20 °C, 40 °C and 60 °C) and, after predetermined periods (for now, up to 6 months), the degradation of their thermomechanical and mechanical properties was evaluated through DMA testing and mechanical testing in tension, compression, flexure, in-plane shear and interlaminar shear.

Materials

The GFRP plates (Figure 1) used in the experiments, with size of 700 mm × 250 mm and thickness of 6.5 mm, were produced by Trimarine Compósitos, Lda. by vacuum infusion. They were prepared from vinyl ester (VE) and unsaturated polyester (UP) resins, using E-glass fibre reinforcement. The two types of GFRP composites have the same fibre architecture, containing 12 layers of unidirectional and quadriaxial fabrics, and two outer layers of chopped strand mat (CSM). Both types of composites were post cured at 80 °C for 12 hours after production.

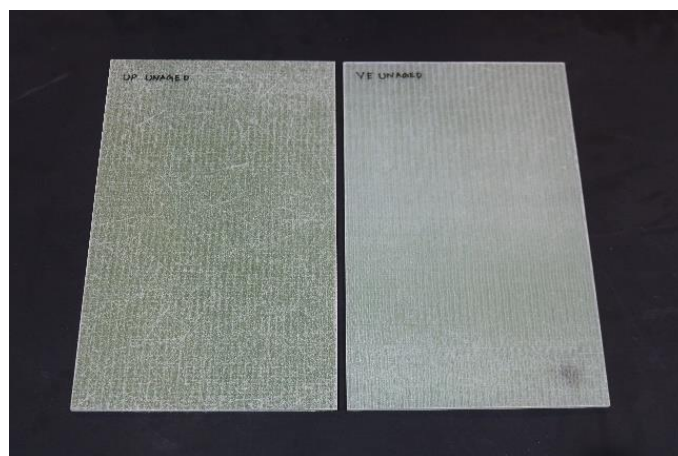


Figure 1: GFRP-UP composite (left) and GFRP-VE composite (right)

The vinyl ester based GFRP composite (GFRP-VE) was produced with Derakane 411-200 resin (which contains 52% of epoxy vinyl ester resin and 48% of styrene), using 1.5% (wt%) methyl ethyl ketone peroxide-MEKP (Ketanox B180), 0.025% (wt%) dimethylaniline-DMA, 0.3% (wt%)

cobalt octoate (1% cobalt) and 0.025% (wt%) 2,4-pentanodiona. The unsaturated polyester based GFRP composite (GFRP-UP) was produced with PolyLite 720-691 resin (containing 50-54% of isophthalic polyester and 46-50% of styrene) and 1.5% (wt%) methyl ethyl ketone peroxide-MEKP (Ketanox B180).

Experimental Program

Exposure Environments. The GFRP plates were submerged in demineralized water at three different temperatures, 20 °C, 40 °C and 60 °C. The size of each water tank (Figure 2) is 900 mm × 600 mm × 500 mm. Each water tank includes an electrical heater that is able to maintain the water temperature at a predefined level. All the lateral edges of the GFRP plates were painted with an epoxy coating (Icosit K-101 N) to avoid water ingress from the sides (Figure 3) and thus promote a unidirectional water diffusion through the composites.

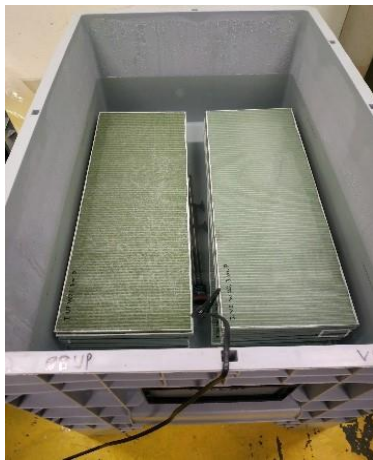


Figure 2: Hygrothermal ageing

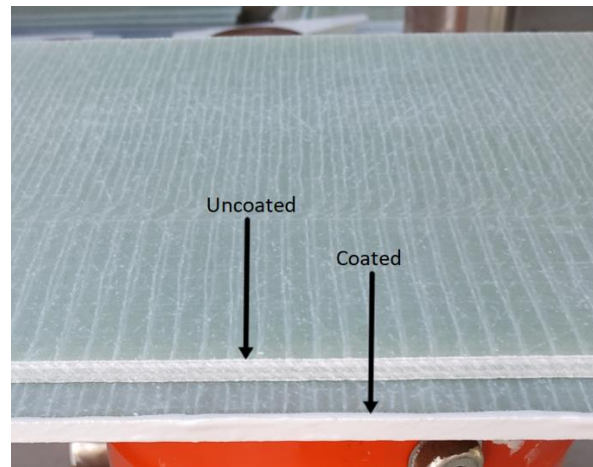


Figure 3: Uncoated and coated edge plates

Test Program. The thermomechanical and mechanical properties were measured before ageing, and after 3 and 6 months of ageing, in both wet (immediately after removal from immersion) and dry conditions. The dry condition was achieved by keeping the aged materials in a ventilated space at room temperature until constant mass was reached (i.e., change in mass lower than 0.01% during a period of 24 hours, measured using a balance with 0.1 mg of accuracy). The tests for dry condition were carried out at least 1.5 months after removal from water. Different tests were conducted to measure the thermomechanical and mechanical properties of the unaged and aged materials, namely DMA tests, and tensile, compressive, in-plane (IP) shear, flexural and interlaminar shear strength (ILSS) tests.

The DMA tests were carried out using a dynamic mechanical analyser, model Q800 DMA (TA Instruments), following the recommendations of the ISO 6721-5:2019 standard. A specimen size of 60 mm × 10 mm × 4 mm was adopted, heated from 25 °C to 200 °C at a rate of 2 °C/mm, while being sinusoidally loaded at a constant frequency of 1 Hz and a strain amplitude of 15 μm. The glass transition temperature, T_g , was determined from the onset decay of the storage modulus (E') curve.

The tensile tests were done using an Instron 5989 (with capacity of 600 kN) universal testing machine (UTM), following the recommendations of the ISO 527-4:2021 standard, using rectangular specimens of 300 mm × 25 mm. The tests were done at a constant displacement rate of 2 mm/min, and the resulting strains were measured with a video extensometer.

The compressive tests were done using the same Instron 5989 UTM and followed the ISO 14126:1999 standard. Rectangular specimens of 153 mm × 25 mm were loaded at a constant displacement rate of 1.3 mm/min. The strains were also measured using a video extensometer.

The in-plane shear tests were done using an Instron 5982 (capacity of 100 kN) UTM, following the recommendations of the ASTM D5379:2019 standard (Iosipescu/V-notch test method). Specimens of 76 mm × 19 mm with V-shaped notches at their mid-section were loaded in shear at a

constant displacement rate of 2 mm/min, and the resulting distortions were measured using a video extensometer.

The flexural tests were done in three-point bending, using the same Instron 5982 UTM, following the ISO 14125:1998 standard. Rectangular specimens of 195 mm × 15 mm were loaded along a 130 mm span at a constant displacement rate of 5 mm/min.

The ILSS tests were also done using the Instron 5982 UTM, following the recommendations of ISO 14130:1998. Rectangular specimens of 65 mm × 32.5 mm were loaded in three-point bending along a span of 32.5 mm at a constant displacement rate of 1 mm/min.

Results and discussion

Initial characterization. Table 1 presents the initial mechanical and thermomechanical properties for the unaged GFRP-VE and GFRP-UP composites.

Table 1: Initial characterization of GFRP composites with VE and UP resins

Properties	GFRP-VE	GFRP-UP
Tensile strength, σ_t [MPa]	790 ± 19	770 ± 35
Tensile modulus, E_t [GPa]	33.9 ± 0.4	34.3 ± 0.6
Compressive strength, σ_c [MPa]	556 ± 45	470 ± 33
Compressive modulus, E_c [GPa]	39.3 ± 2.0	36.8 ± 2.7
In-plane shear strength, t [MPa]	148 ± 3	139 ± 4
In-plane shear modulus, G [GPa]	3.8 ± 0.2	3.1 ± 0.2
Flexural strength, σ_f [MPa]	806 ± 41	807 ± 21
ILSS, σ_{ILSS} [MPa]	47 ± 1	42 ± 2
Glass transition temperature, T_g [°C]	95 ± 0.2	86 ± 1

The results presented in Table 1 show that, overall, the properties obtained for both types of composites were very similar, being slightly higher for GFRP-VE. The most significant differences generally correspond to matrix-dominated properties, for which the values for GFRP-VE were slightly higher, likely reflecting the slightly better mechanical performance and higher T_g of the VE resin.

Glass transition temperature after ageing. Figures 4 and 5 present the T_g retention of the GFRP-VE and GFRP-UP composites, respectively, after 3 and 6 months of hygrothermal ageing. The results obtained were quite consistent (the coefficient of variation, COV) of the results for these tests was generally lower than 1%). Here and in the remainder of the paper, the term “property retention” is used to describe the ratio between the value of a given property after ageing and its initial value (as presented in Table 1). W20 (S) and W20 (D) denote respectively wet and dry materials after ageing at 20 °C. Here, “W” represents hygrothermal ageing, “20” represents ageing at 20 °C, and “S” and “D” represent wet and dry conditions, respectively. Other codes have similar meaning for the respective temperatures.

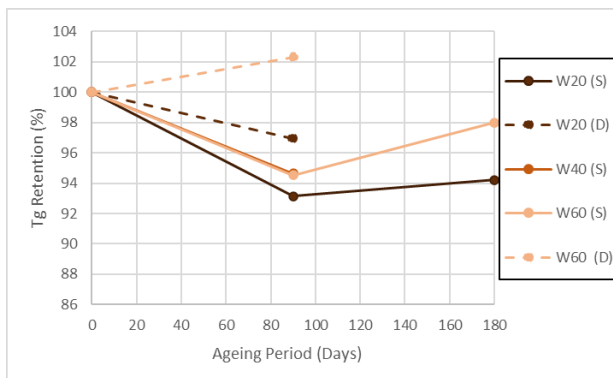


Figure 4: T_g retention for GFRP-VE

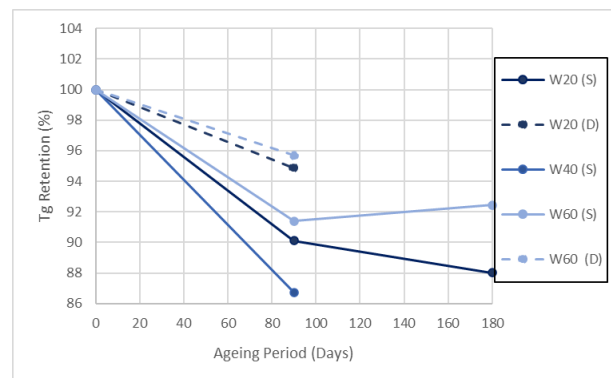


Figure 5: T_g retention for GFRP-UP

Figure 4 shows that the hygrothermal exposure had only a slight effect on the T_g of GFRP-VE (data for dried materials for 3 months of ageing at 40 °C, wet material for 6 months of ageing at 40 °C and dried material for 6 months of ageing for all temperatures are not yet available). For 3

months of ageing, the T_g retention in the wet material is almost similar for all temperatures, with the property reduction not being very significant (~5%). Regarding the materials tested after drying to constant mass, a slight property recovery has been observed for 20 °C and 60 °C (especially in the latter, for which an increase in T_g relative to the initial value was observed), suggesting that (i) some part of the property reduction was due to reversible mechanisms, such as plasticization, and (ii) post-curing of the VE resin took place either during the 3-month ageing period or during the drying procedure (or both). For 6 months of ageing, the retention increased slightly for 60 °C aged specimens tested in wet conditions compared to the respective 3-month value, suggesting that post-curing occurred during the accelerated ageing.

Figure 5 shows that the reductions in T_g were generally more pronounced for GFRP-UP than for the VE counterpart (data for dried materials for 3 months of ageing at 40 °C, wet material for 6 months of ageing at 40 °C and dried material for 6 months of ageing for all temperatures are not yet available). For 3 months of ageing, the highest degradation in wet material occurred at 40 °C and the lowest at 60 °C. This suggests that post-curing occurred simultaneously with hygrothermal degradation, and it was more pronounced for the highest ageing temperature. A slight recovery of T_g is observed here for dried materials as well. For 6 months of ageing, a similar trend of slight property recovery, as discussed above for GFRP-VE, was observed for GFRP-UP.

Tensile strength after ageing. Figures 6 and 7 represent the retention of tensile strength by GFRP-VE and GFRP-UP, respectively. Once again, the results were quite consistent (in this case, the COV varied between 1.5% to 3.5% for GFRP-VE and 2% to 5% for GFRP-UP).

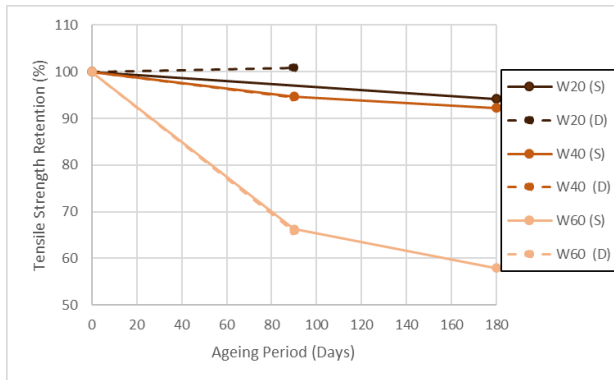


Figure 6: Tensile strength retention for GFRP-VE

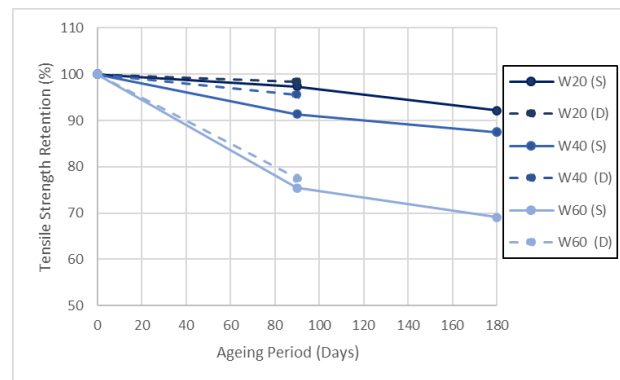


Figure 7: Tensile strength retention for GFRP-UP

In what concerns the retention of tensile strength for GFRP-VE (note that data for wet material for 3 months of ageing at 20 °C and dried material for 6 months of ageing at all temperatures are not currently available), Figure 6 shows that hygrothermal ageing had a relatively small effect (less than 10%) on tensile strength at lower temperatures (up to 40 °C). However, a sharp decrease in tensile strength after 3 months of immersion at 60 °C was observed (~35%). Similar trends were observed for wet materials after 6 months of ageing, with ~40% reduction at 60 °C. The results show that hygrothermal ageing becomes much more impactful at higher temperatures (as expected), given that both the water uptake and the rate of the various degradation mechanisms increase with increasing temperature. It should be noted that no significant recovery was observed after drying the materials. This suggests that the degradation occurring is mostly permanent (e.g., hydrolysis and/or fibre-matrix debonding). It is also noteworthy that the difference between strength retention for 3 and 6 months of ageing for 60 °C immersion is relatively low, suggesting that (i) a significant part of the hygrothermal degradation is occurring during the initial period of exposure, and (ii) subsequently, the impact of degradation may be compensated by additional post-curing of the resin. Regarding the tensile strength retention for GFRP-UP as a function of time (data for dried material for 6 months of ageing at all the temperatures are not yet available), Figure 7 shows that for 3 and 6 months of ageing, similar trends to GFRP-VE are observed for GFRP-UP in terms of strength retention as a function of temperature. However, in this case the strength reduction at 60 °C is not as sharp as in GFRP-VE (~25% and ~30% after 3 and 6 months of immersion, respectively). Similar to GFRP-VE, very low strength retention is observed upon drying and no significant

difference in strength retention exists between 3 and 6 months of ageing, suggesting the occurrence of similar mechanisms to those mentioned before.

Compression strength after ageing. Figures 8 and 9 depict the retention of compressive strength for GFRP-VE and GFRP-UP, respectively. The COV was higher compared to tensile strength, varying from 3.5% to 8% for GFRP-VE and 3% to 7% for GFRP-UP.

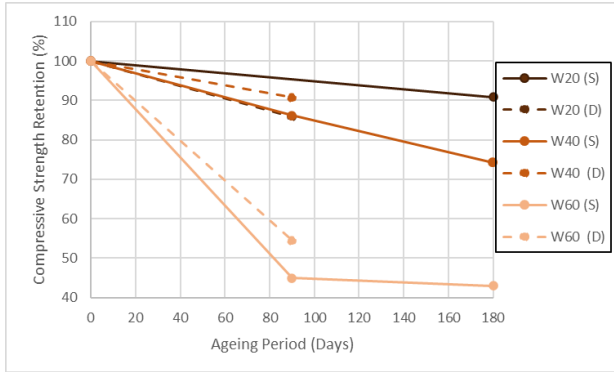


Figure 8: Compressive strength retention for GFRP-VE

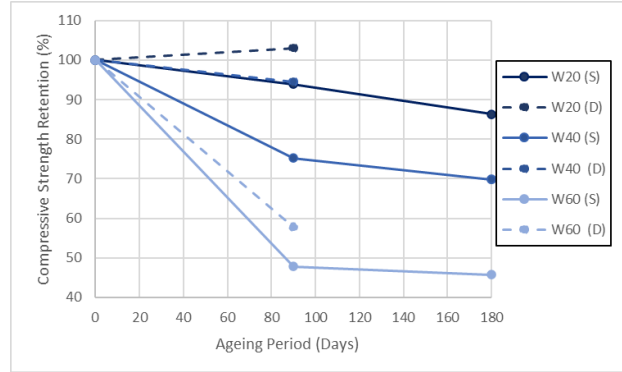


Figure 9: Compressive strength retention for GFRP-UP

Regarding GFRP-VE (the data for wet material for 3 months of ageing at 20 °C and dried material for 6 months of ageing for all temperatures are not currently available), a sharp decrease in compressive strength is also observed after 3 months of exposure at 60 °C, a similar trend to that observed for the tensile strength of this material. However, the maximum degradation in compressive strength is much more severe at 60 °C compared to the tensile strength at the same temperature (~55%); furthermore, significant reductions in compressive strength can also be observed at lower temperatures, particularly at 40 °C (~25%). Since the compressive strength is very much influenced by the mechanical properties of the polymeric matrix [12], this steeper reduction in compressive strength is consistent with a higher impact of the hygrothermal environment in the resin properties and fibre-matrix adhesion. This is also supported by a slightly higher property recovery, which is observed here for dried materials compared to the tensile strength of GFRP-VE, indicating additional post-curing of the vinyl ester resin. This post-curing occurs more intensely at higher temperatures, which could justify the slightly lower property retention in dried specimens aged at 20 °C compared to 40 °C. For 6 months of ageing, the evolution of compressive strength retention follows the same general trends as tensile strength, with some stabilization of retention at 60 °C and further moderate reductions for the lower temperatures. Regarding the compressive strength of GFRP-UP (the data for the dried material for 6 months of ageing for all temperatures are not yet available), data for 3 months of ageing shows reductions of compressive strength increasing with temperature. Similar to GFRP-VE, significant reductions are observed for ageing at 40 °C and 60 °C (~25% and ~50%, respectively). For the dried materials, significant recovery is observed for all temperatures, especially at 40 °C, suggesting different balances between post-curing and reversible and irreversible degradation among the different immersion temperatures. In general, after 6 months of ageing, the additional reductions of compressive strength were moderate compared to the results for 3 months, showing a reduction in the rate of property decrease with the exception of 20 °C immersion.

In-plane shear strength after ageing. Figures 10 and 11 illustrate the retention of in-plane shear strength by GFRP-VE and GFRP-UP, respectively. The COV for GFRP-VE generally varied between 1.5% and 5%, the only exception being the dry condition after 3 months of ageing at 40 °C, for which a COV of 9.9% was obtained. For GFRP-UP, the COV values ranged between 2.8% and 6%.

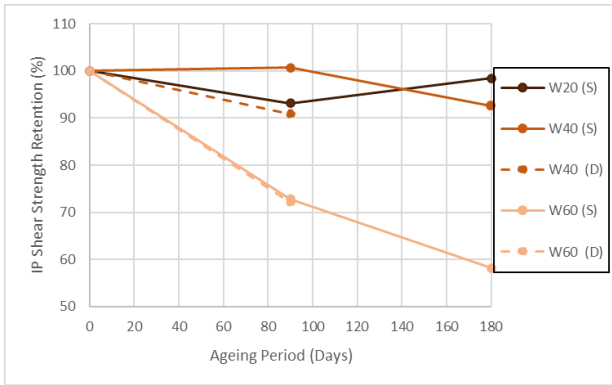


Figure 10: IP shear strength retention for GFRP-VE

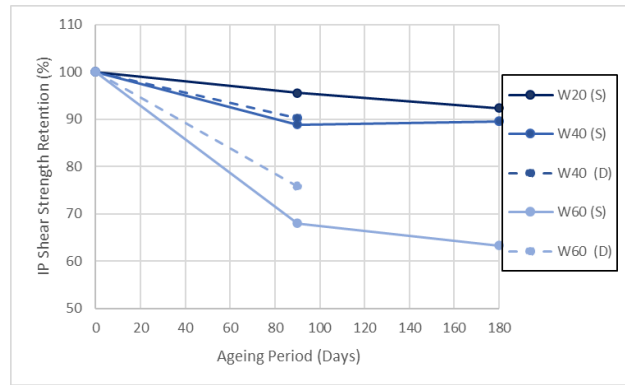


Figure 11: IP shear strength retention for GFRP-UP

Regarding the in-plane shear strength of GFRP-VE (data for dried material after 3 months of ageing at 20 °C and dried material for 6 months of ageing at all temperatures are not yet available), as for the previously mentioned properties, there were significant reductions of in-plane shear strength for 3 and 6 months of ageing at 60 °C (~30% and ~40%, respectively), while the reduction at the lower temperatures were less significant (less than 10%). After 3 months of ageing at 40 °C, the retention for the dry condition was about 10% lower compared to the wet condition, which was somehow an unexpected result; this could be related with the experimental scatter - as mentioned, the COV for the dry condition was relatively high (~10%). Consequently, these tests will be repeated in the near future to confirm these values. Again, the most significant differences in property retention after 3 and 6 months were found for the exposure at 60 °C. The overall behaviour is consistent with the trends already reported for the other mechanical properties for GFRP-VE.

Regarding the GFRP-UP (data after 3 months of ageing at 20 °C and dried material for 6 months ageing at all temperatures are not yet available), the available results show a trend of relatively low (up to ~10%) reductions of in-plane shear strength for lower temperatures of exposure (especially at 20 °C), followed by a sharp decrease at the highest temperature of 60 °C for 3 and 6 months of ageing (~30% and ~35%). Also, a slight recovery is observed for dried materials. Again, similar to most of the previous properties for GFRP-UP, the differences between the hygrothermal ageing effects after 3 and 6 months are relatively small.

Flexural strength after ageing. Figures 12 and 13 present the retention of flexural strength by GFRP-VE and GFRP-UP, respectively. For both type of composites, the COV varies between 2.5% to 5%; the only exception is observed for wet GFRP-UP after 6 months of ageing at 60 °C, for which the COV is 7.5%.

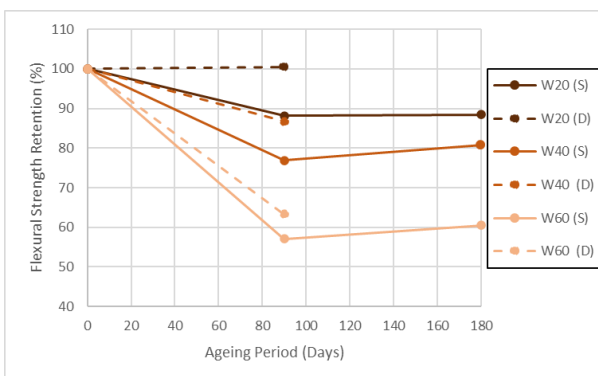


Figure 12: Flexural strength retention for GFRP-VE

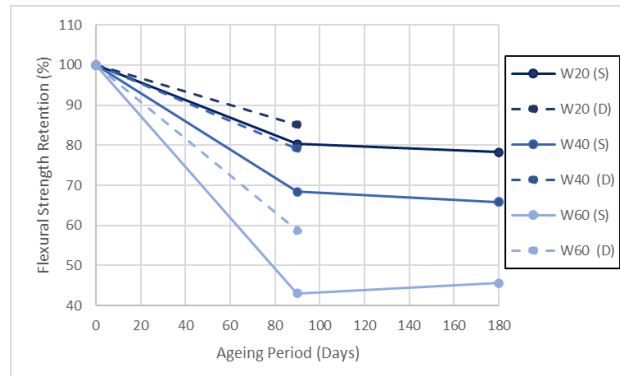


Figure 13: Flexural strength retention for GFRP-UP

Like for previous results, some data points for both GFRP-VE and GFRP-UP are not yet available. Figure 12 shows that the flexural strength of GFRP-VE showed significant reductions after only 3 months of hygrothermal ageing (up to ~40%), increasing in magnitude with increasing temperature. The observed property reductions are in good agreement with the previously mentioned higher susceptibility of matrix-dominated properties to hygrothermal degradation. Also, strength retention between 3 and 6 months of ageing was again relatively stable. In terms of dried

materials for 3 months of ageing, the recovery was significant for 20 °C and 40 °C, while for 60 °C only a slight recovery was observed. This behaviour suggests that (i) the degradation at 20 °C occurred mostly from physical phenomena, (ii) at 60 °C, it mainly occurred from irreversible phenomena, and (iii) at 40 °C, both reversible and irreversible degradation had significant contributions.

Regarding the GFRP-UP, like in previous instances, some data points are also missing from this dataset. Similar to the trend observed in GFRP-VE, significant flexural strength reduction is observed for GFRP-UP, even at lower temperatures, and the strength retention reaches as low as 43% and 46% at 60 °C for 3 and 6 months of ageing, respectively. The strength retentions for the dried materials after 3 months of ageing are still relatively low, especially at the highest temperature. This highlights the importance of the aforementioned irreversible degradation in the unsaturated polyester resin.

Interlaminar shear strength after ageing. Figures 14 and 15 depict the retention of ILSS for GFRP-VE and GFRP-UP, respectively. The COV values of ILSS were relatively low (varying from 1.5% to 3.5% for GFRP-VE and from 2% to 6% for GFRP-UP).

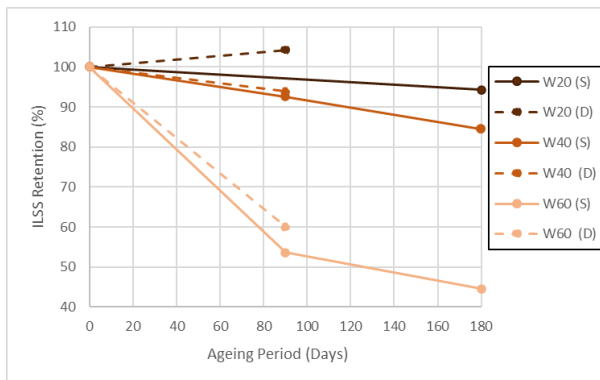


Figure 14: ILSS retention for GFRP-VE

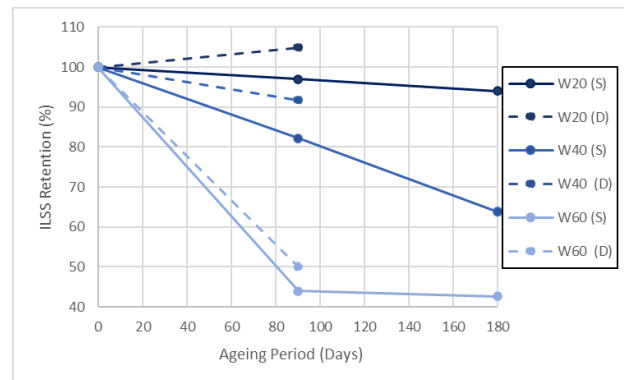


Figure 15: ILSS retention for GFRP-UP

Again, some data points are missing from Figure 14, as the respective results are not available yet. However, the data plotted in this figure show that hygrothermal exposure at the lower temperatures had a relatively moderate impact on the ILSS of GFRP-VE after 3 months of ageing (less than 10%), namely considering also the results obtained for the dry materials. Conversely, for immersion at 60 °C, a very significant decrease in property retention was observed after only 3 months of ageing (~50%), with further reductions (albeit at a lower rate) occurring up to 6 months. In this instance, the results suggest once more that irreversible chemical degradation had a significant impact on the matrix-dominated properties of this material, as reflected in the minute property recovery after drying. These trends are in line with the previously described behaviour for the GFRP-VE.

Regarding the GFRP-UP, data for the dry material for 6 months of ageing at all temperatures is not yet available. However, one can observe that the hygrothermal exposure affected the ILSS of the GFRP-UP in a slightly different manner compared to the GFRP-VE; in particular, unlike the GFRP-VE, hygrothermal ageing at 40 °C had significant impact in the ILSS of GFRP-UP, which decreased ~20% and ~35% after 3 and 6 months, respectively. Furthermore, the strength recovery upon drying was relatively low, highlighting once again the occurrence of significant chemical degradation and fibre-matrix debonding mechanisms. After 6 months of ageing at the highest immersion temperature of 60 °C, the ILSS retention of GFRP-UP did not change compared to 3 months, indicating some property stabilization.

Conclusion

This paper presented the preliminary results from an ongoing experimental study on the effects of hygrothermal ageing on the thermomechanical and mechanical properties of GFRP composites produced by vacuum infusion using two alternative resins, VE and UP. These composites were

immersed in demineralized water at three different temperatures of 20 °C, 40 °C and 60 °C. After 3 and 6 months of ageing, their thermomechanical and mechanical properties were measured, and the property retention was calculated.

After 3 and 6 months of ageing, the T_g retention of GFRP-VE and GFRP-UP was only slightly affected by hygrothermal ageing, albeit with higher intensity for the latter material. The results obtained suggest that competitive phenomena of post-curing and hygrothermal degradation occurred simultaneously in the two composites, both occurring at higher rates with increasing temperature. Overall, the variations of T_g for the two materials were not particularly significant. In terms of mechanical properties, in general, property retention decreased with increasing exposure temperature and sharp reductions were observed after immersion at 60 °C. Matrix-dominated properties typically presented higher degradation. Furthermore, upon drying, strength retention generally presented only slight recovery, suggesting that the reductions mainly occurred due to irreversible degradation, especially at higher temperatures. However, in some cases, for matrix-dominated properties, some significant recovery after drying was observed, suggesting also the occurrence of reversible physical degradation and its recovery after drying. It has also been observed that most of the strength degradation occurred within the first 3 months of ageing. In very few instances, significant additional strength decrease occurred between 3 and 6 months of exposure, which, once again, was observed mainly for matrix-dominated properties.

After 3 months of ageing, GFRP-VE had better property retention than GFRP-UP in terms of T_g , flexural strength and ILSS. As for the retention of tensile, compressive and IP shear strength, no specific trend was observed in terms of the relative performance of both composites. After 6 months of ageing, the retention of all mechanical and thermomechanical properties was always higher for GFRP-VE than for GFRP-UP. This indicates that the vinyl ester-based composite is presenting better performance under moisture exposure than the unsaturated polyester-based composites. This result, which is in line with several studies reported in the literature (but needs to be confirmed in subsequent stages of this project), can be explained by the fact that the vinyl ester resin has its ester functional groups shielded by vinyl groups and has fewer sites in the polymer chain that are susceptible to hydrolytic reactions, which makes it less susceptible to hydrolysis than unsaturated polyester [13, 14]. The results to be obtained in the next stages of this project are expected (i) to provide a better understanding of the degradation mechanisms affecting GFRP composite materials produced by vacuum infusion, and (ii) to allow the development of degradation models and design recommendations for such materials, thus enabling a more widespread use of such materials in civil engineering applications.

Acknowledgements

The authors thank Fundação para a Ciência e a Tecnologia for the funding provided to the project Durable-FRP (PTDC/ECI-EGC/4609/2020).

References

- [1] J. Bai (Editor): *Advanced fibre-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Structural Applications* (Woodhead Publishing, New Delhi 2013).
- [2] J.R. Correia, in: *Materials for Construction and Civil Engineering: Science, Processing and Design*, edited by F. Margarido, M.C. Gonçalves, Springer, 2015.
- [3] J.R. Correia, S. Cabral-Fonseca, A. Carreiro, R. Costa, M.P. Rodrigues, I. Eusébio, F.A. Branco, *Effects of hygrothermal ageing on the mechanical properties of GFRP pultruded profiles*, *Structural Engineering International*, 4 (2010) 370-378.
- [4] K. Van de Velde, P. Kiekens, *Effects of chemical environments on pultruded E-glass reinforced polyesters*, *Journal of Composites Technology and Research*, 23 (2001) 92-101.

- [5] D. Leveque, A. Schieffer, A. Mavel, J.F. Maire, *Analysis of how thermal aging affects the long-term mechanical behavior and strength of polymer-matrix composites*, *Composites Science and Technology*, 65 (2005) 395-401.
- [6] J.M. Sousa, J.R. Correia, S. Cabral-Fonseca, A.C. Diogo, *Effects of thermal cycles on the mechanical response of pultruded GFRP profiles used in civil engineering applications*, *Composite Structures*, 116 (2014) 720-731.
- [7] P.K. Dutta, D. Hui, *Low-temperature and freeze-thaw durability of thick composites*, *Composite Part B: Engineering*, 27 (1996) 371-379.
- [8] F. Segovia, C. Ferrer, M.D. Salvador, V. Amigo, *Influence of processing variables on mechanical characteristics of sunlight aged polyester-glass fibre composites*, *Polymer Degradation and Stability*, 71(2001)179-184.
- [9] M. K. Antoon, J. L. Koenig, *The Structure and Moisture Stability of the Matrix Phase in Glass-Reinforced Epoxy Composites*, *Journal of Macromolecular Science: Part C*, 19:1(1980) 135-173.
- [10] J. Mijović, K. F. Lin, *The effect of hygrothermal fatigue on physical/mechanical properties and morphology of neat epoxy resin and graphite/epoxy composite*, *Journal of Applied Polymer Science*, 30 (1985) 2527-2549.
- [11] V. M. Karbhari (Editor): *Durability of Composites for Civil Structural Applications*, (Woodhead Publishing, Florida 2007).
- [12] B. Budiansky, N.A. Fleck, *Compressive failure of fibre composites*, *J. Mech. Phys. Solids*, 41:1 (1994) 183-211.
- [13] J.M. Sousa, M. Garrido, J.R. Correia, S. Cabral-Fonseca, *Hygrothermal ageing of pultruded GFRP profiles: Comparative study of unsaturated polyester and vinyl ester resin matrices*, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 140 (2021) 106193.
- [14] J. W. Chin, K. Aouadi, M. R. Haight, W. L. Hughes, and T. Nguyen, *Effects of Water, Salt Solution and Simulated Concrete Pore Solution on the Properties of Composite Matrix Resins Used in Civil Engineering Applications*, *Polymer Composites*, 22 (2001) 282-298.

Incorporação de lignina em bio-resina para aplicações em materiais compósitos

SANTOS Marina^{1,a}, HOFMANN Mateus^{2,b}, GARRIDO Mário^{1,c}, CORREIA João R. ^{1,d} e BORDADO João ^{3,e}

¹CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal

² Composite Construction Laboratory, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Switzerland

³ CERENA, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal

^a marina.leal.santos@tecnico.ulisboa.pt, ^b mateus.hofmann@epfl.ch,

^c mario.garrido@tecnico.ulisboa.pt, ^d joao.ramoa.correia@tecnico.ulisboa.pt,

^e jcbordado@tecnico.ulisboa.pt

Palavras-chave: Bio-compósitos, Bio-resina, Lignina, FRP.

Resumo. Os materiais compósitos de polímeros e fibras sintéticas (FRP) têm demonstrado eficiência no que diz respeito a aplicações estruturais em Engenharia Civil, apresentando ainda vantagens pelo seu carácter pré-fabricado e rápida instalação. Contudo, as resinas poliméricas utilizadas nos materiais FRP são derivadas do petróleo, o que coloca em causa a sustentabilidade a longo-prazo daqueles materiais. Assim, o desenvolvimento de resinas bio-derivadas (bio-resinas) obtidas a partir de matérias-primas renováveis assume particular importância neste setor. A lignina, o segundo bio-polímero de maior abundância a nível global, por ter anéis fenólicos na sua estrutura, tem o potencial para aumentar o desempenho das resinas tipicamente utilizadas no fabrico dos FRP, em particular no que diz respeito à sua resistência à tração, ao corte e às temperaturas elevadas. Adicionalmente, contribui para o aumento do conteúdo renovável na composição destas. No presente artigo, apresentam-se os resultados comparativos de testes de tração, corte, termomecânicos (DMA) e termo-gravimétricos (TGA) a duas resinas de vinil éster com conteúdo parcialmente bio-derivado, uma com adição de lignina na sua cadeia principal (BVE-L) e outra sem a incorporação desse monómero (BVE), utilizada como referência. Os resultados obtidos mostraram que, apesar do inconveniente associado à necessidade de cura a temperatura elevada, a adição de 4% em peso de lignina foi capaz de aumentar a resistência à tração em 24%, a resistência ao corte em 13% e aumentar a T_g em 8°C.

Introdução

A sustentabilidade do setor da construção civil é um tema que tem motivado a busca por novas metodologias construtivas, com maior eficiência energética, menor geração de resíduos e que proporcionem ganhos económicos associados à agilidade da construção. Este é um setor que tem um impacto significativo na qualidade de vida da sociedade, quer no que diz respeito às condições de utilização das edificações, quer quanto aos impactes ambientais por estas gerados [1,2]. Neste contexto, de entre as novas metodologias e materiais adotados na indústria da construção, os compósitos de polímeros reforçados com fibras (FRP) têm ganho uma crescente importância, pois apresentam vantagens significativas em relação a outros materiais tradicionais: elevada resistência, durabilidade, leveza e elevados rácios resistência/peso e rigidez/peso, permitindo, por isso, um menor consumo de recursos naturais. Para além disso, a sua instalação é tipicamente rápida, resultando numa maior eficiência durante a fase de construção [3].

Uma das desvantagens dos compósitos FRP é o facto das resinas poliméricas convencionalmente utilizadas na matriz dos compósitos FRP ser de origem petrolífera, um recurso não renovável, gerando um impacte ambiental adverso durante a sua produção. Com o intuito de mitigar os efeitos da utilização deste tipo de materiais, estudos recentes têm mostrado o potencial das resinas

desenvolvidas a partir de monómeros de origem sustentável, obtidos a partir de matérias-primas renováveis, desenvolvendo-se assim bio-resinas com características equivalentes às das resinas poliméricas convencionais [4,5].

Neste contexto, a biomassa lignocelulósica destaca-se como uma matéria-prima de origem natural, passível de ser utilizada no desenvolvimento de polímeros, por ser um recurso renovável abundante, composto principalmente por celulose, hemiceluloses e lignina. Em alternativa, através de outros processos de refinação da biomassa, é possível também obter diversos monómeros, tais como, o 1,3-propanodiol (PDO), isosorbida (ISO), ácido fumárico (FA), vanilina, limoneno, ácido itacónico, entre muitos outros, os quais já se tem demonstrado constituírem uma alternativa promissora aos recursos petroquímicos para a produção de biocombustíveis e polímeros [4,6].

A lignina é um polímero natural, amorfo, tridimensional e tem sido citado como um produto promissor, sendo obtido a partir de biomassa, por diferentes processos de isolamento, inclusive sendo o principal sub-produto da indústria do papel. A caracterização da lignina pode ser feita com uma ampla variedade de técnicas, como métodos espectroscópicos e cromatográficos, para quantificar os seus monómeros de constituição, sendo os principais o álcool p-cumarílico, o álcool coniferílico e o álcool sinapílico, que se apresentam em diferentes proporções dependendo da biomassa original [7,8]. Estes monómeros que constituem são aromáticos e possuem anéis fenólicos; que, quando presentes numa estrutura polimérica, conferem melhores propriedades de reação ao fogo, pois carbonizam quando queimados [9]. Portanto, a quebra da lignina fornece produtos químicos aromáticos valiosos que possuem estrutura semelhante ao fenol, no entanto, isolar os monómeros acarreta a necessidade de processos tecnológicos com elevados custos associados [7,10]. Por isto, esforços têm sido feitos no sentido do emprego da lignina para o desenvolvimento de resinas, colas, adesivos, espumas e outros materiais poliméricos sem o isolamento dos seus monómeros [11–16].

A resina do tipo fenólica é mais comumente empregue na produção de compósitos FRP quando o comportamento térmico é particularmente importante; contudo, devido às dificuldades associadas à sua composição, como a elevada liberação de água durante o processo de reticulação, cura térmica, comportamento frágil (devido à ausência de componentes de cadeia longa), e módulos de elasticidade e de distorção inferiores a outros tipos de resina [17,18], estas resinas têm um campo de aplicação relativamente estreito. Assim, as resinas mais utilizadas para a produção de compósitos FRP de uso geral são do tipo vinil éster (VE), poliéster insaturado e epoxídicas.

Neste sentido, no estudo apresentado no presente artigo, foi feita a incorporação de lignina (4% w/w), na primeira etapa de uma síntese de dois passos para a produção de uma resina do tipo VE, constituída parcialmente por monómeros de origem renovável na cadeia principal, nomeadamente PDO, ISO, e FA, mas também anidrido orto-ftálico (PA) de origem petrolífera (Figura 1). Esta adição foi realizada com o objetivo de aumentar o conteúdo renovável da formulação e conferir maior rigidez à cadeia polimérica. Foram sintetizadas duas bio-resinas VE, uma sem a presença de lignina (BVE) e outra com a presença de lignina (BVE-L). Estas resinas resultam da modificação da cadeia polimérica de uma bio-resina de poliéster insaturado (BUPE), anteriormente desenvolvida no IST e já utilizada com sucesso no processo de pultrusão de laminados de CFRP [19]. As resinas foram submetidas a ensaios mecânicos e térmicos para identificar a influência da adição de lignina nas suas propriedades mecânicas e termomecânicas; em particular, foram realizados testes de tração, corte no plano, análises mecânicas dinâmicas (DMA) e análises termo-gravimétricas (TGA).

Materiais e métodos

Materiais. O ISO (>98%) foi obtido da TCI (Japão), o PDO foi obtido da DuPont e Tale & Lyle, com nome comercial Susterra™ propanediol. O FA (>98%), o PA (99%), e o metacrilato de 2-hidroxietilo (97% - HEMA) foram obtidos de SigmaAldrich. O estireno (99% - STY), o peróxido de metiletilcetona (PMEK) e o octoato de cobalto 1% (OC) foram obtidos da EcoCompósitos S.A. Todos os reagentes foram usados tal como recebidos, com exceção da lignina acidificada (LIG), obtida da TCI, que, antes de ser incorporada na síntese, foi lavada com água destilada para remoção da fase inorgânica.

Síntese. Os pré-polímeros foram preparados por uma reação de policondensação em massa, realizada em duas etapas, seguindo as formulações mostradas na Tabela 1 e ilustradas na Figura 1. Ambas as resinas foram produzidas com ácidos saturados e insaturados num rácio de 1:2,5, sendo o FA o ácido saturado e o PA o ácido insaturado. Na síntese da resina BVE, foi usado um excesso de glicol de 15% em mol; na síntese da resina BVE-L, utilizou-se um excesso de glicol de 12% para compensar a incerteza associada à funcionalidade da LIG, cujo peso molecular (M_w) de 9190 g/mol foi obtido por meio de uma análise de cromatografia de permeação em gel (GPC). É de realçar que esta análise só foi feita para a LIG, pois a informação não constava na sua ficha técnica.

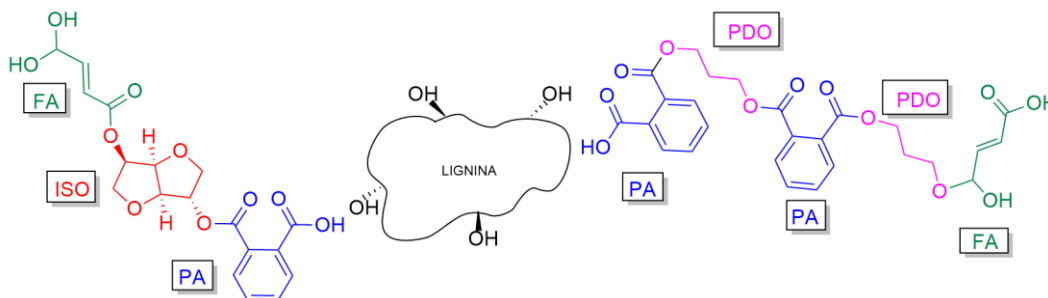


Figura 1: Estrutura polimérica da primeira etapa da síntese

Para as sínteses, os reagentes foram adicionados a um reator de 2 l (com válvula de fundo – Figura 2) e tampa de cinco juntas esmerilhadas, equipado com um agitador mecânico em formato de âncora, um termopar para controlar uma manta de aquecimento com uma temperatura nominal de 206 °C (variando entre 202 e 210 °C), uma entrada de azoto, um condensador acoplado a um recetor de destilação (formada pela reação e solubilização da matéria-prima) e uma entrada com tampa, onde se utilizou um funil de adição para introduzir a quantidade total de FA na segunda etapa. Os reagentes foram carregados a temperatura ambiente. Após a montagem do sistema reacional, aplicou-se agitação e temperatura para promover a ligação entre os grupos OH dos glicóis e os grupos COOH do PA; o progresso da primeira etapa foi monitorizado por titulação ácido-base, medindo-se o valor ácido (*acid number*, AN) até que este estivesse abaixo de 30 mgKOH/g.

- 1 – Condensador
- 2 – Recetor de destilação
- 3 – Agitador mecânico
- 4 - Termopar
- 5 - Reator
- 6 – Pá de agitação
- 7 – Manta de aquecimento

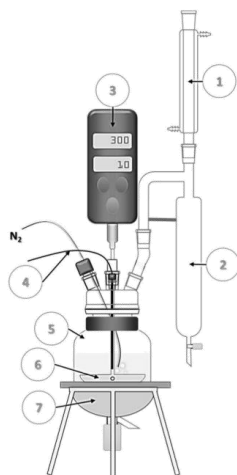


Figura 2: Sistema reacional, figura adaptada de [20]

Em seguida, para a segunda etapa, o reator foi arrefecido a uma temperatura de 100 °C e a rotação reduzida para, com auxílio do funil de adição, incorporar o FA ao sistema. A síntese foi assim realizada com o objetivo de as duplas ligações insaturadas do FA ficarem, forçadamente, nas pontas das cadeias, tornando a resina menos hidrofílica do que uma resina de poliéster insaturado, caracterizando uma estrutura do tipo VE. A segunda etapa da reação prosseguiu até que o AN atingisse um valor constante ou a viscosidade atingisse o valor de 16000 cP, medida a 125 °C num viscosímetro de cone e placa, para possibilitar a incorporação dos diluentes reativos.

Ao alcançar um destes critérios, os pré-polímeros de VE foram arrefecidos a uma temperatura de 160 °C e, em seguida, diluídos, sem qualquer etapa de purificação, numa mistura em partes iguais de estireno (STY) e 2-hidroxiethyl metacrilato (HEMA), mantendo-se o sistema numa temperatura de incorporação entre 60 e 70 °C.

Na fase de processamento, os diluentes permitem o ajuste da viscosidade do produto final e, na fase de endurecimento, os diluentes reativos conectam as cadeias lineares de VE através dos pontos de reticulação das duplas ligações insaturadas do FA. Das diversas composições testadas, a apresentada no presente artigo (Tabela 1) foi a que apresentou o melhor equilíbrio entre propriedades mecânicas, termomecânicas, características de processamento (para diferentes técnicas de produção de compósitos FRP) e sustentabilidade, pelo uso de monómeros de origem renovável e diminuição da concentração de STY (parcialmente substituído por HEMA), monómero comumente utilizado como único diluente reativo em resinas de VE e poliéster insaturado, mas potencialmente prejudicial à saúde [21]. A adição dos diluentes reativos promove, durante a etapa de cura, a conexão entre as cadeias de VE pelos pontos de insaturação do FA, gerando uma estrutura reticulada do tipo termoendurecível.

Tabela 1: Composição molar e em massa das resinas testadas

Monómeros	BVE	BVE	BVEL	BVEL
	mol	Peso seco [g]	mol	Peso seco [g]
PA	1,00	148,11	1,00	148,11
FA	2,50	292,18	2,59	292,18
PDO	2,75	187,99	2,59	197,27
ISO	1,37	200,58	1,29	188,29
LIG	-	-	0,00 ¹	35,74

Produção de provetes. A produção das placas de resina para extração de provetes foi efectuada de forma diferente para as resinas BVE e BVE-L, pois, devido à natureza fenólica da lignina, a cura da resina BVE-L só foi possível com temperatura elevada (80 °C).

Foram utilizados moldes abertos na sua extremidade superior compostos por: (1) duas placas de vidro temperado, de 50 x 50 cm² para a resina BVE e de 20 x 20 cm² para a resina BVE-L (de modo a que os provetes resultantes pudessem ser colocados no interior de uma estufa para a cura da resina); (2) spray desmoldante, aplicado sobre as superfícies interiores das placas, para possibilitar a remoção das placas após a cura; (3) um cordão, de borracha para a resina BVE e de silicone para a resina BVE-L, utilizado para selar as aberturas entre os vidros; (4) espaçadores acrílicos com 4 mm de espessura, adjacentes (e exteriores) ao cordão de borracha; e (5) grampos de aperto para fixar o sistema.

A resina BVE foi curada por 24 h a temperatura ambiente e a resina BVE-L foi curada durante 3 h a uma temperatura constante de 80 °C. Posteriormente, ambas as resinas foram pós-curadas a 100 °C por 4 h, e arrefecidas à temperatura ambiente para que estivessem completamente estáveis antes do corte dos provetes para os diversos ensaios de caracterização, descritos adiante. Os provetes, com dimensões estabelecidas a fim de respeitar a norma correspondente a cada tipo de ensaio, foram extraídos das placas com recurso a uma máquina de corte CNC (*computer numerical control*).

Ensaio de caracterização. Os ensaios de tração foram realizados segundo a norma ASTM D638-14 e os ensaios de corte no plano seguiram as recomendações da norma ASTM D5379/D5379M (método de Iosipescu ou V-notched beam). Para cada ensaio, foram preparados cinco provetes de cada tipo de resina, que foram testados em condições laboratoriais à temperatura ambiente, a uma velocidade de 1 mm.min⁻¹, aplicada por uma máquina de ensaios universal eletromecânica *Instron 5982*, com capacidade de 100 kN. As deformações dos provetes foram medidas com recurso a um vídeo-extensómetro (câmara SONY XCG-5005E com lente Fujinon - Fujifilm HF50SA-1).

¹ Para a BVEL substitui-se 10% da quantidade total de glicóis em isosorbida por de lignina, o que representa 0,004 mols da composição total devido ao alto peso molecular da lignina.

Foram efectuados ensaios de termogravimetria (TGA) a amostras de ambas as resinas, usando um equipamento *Hitachi-STA7200*, calibrado de acordo com instruções do fabricante, e o ensaio foi realizado segundo a norma ASTM 2550. Amostras entre 15 e 30 mg de cada resina foram colocadas em cadinhos de alumínio e aquecidas desde a temperatura ambiente até 600 °C, a uma taxa de aquecimento de 10 °C.min⁻¹, sob um fluxo de oxigénio (ar sintético) de 100 ml.min⁻¹.

Foram realizados ensaios de DMA a amostras de ambas as resinas para obter as suas propriedades termomecânicas, usando um aparelho da *TA Instruments*, modelo *DMA Q800* segundo as recomendações da norma ASTM E1640. Os provetes foram testados numa configuração bi-encastrada, com 35 mm de vão, com amplitude de deformação de 15 µm para a resina BVE e 10 µm para a resina BVE-L (devido à natureza frágil da amostra), ambas com frequência de oscilação constante de 1 Hz e variação de temperatura entre -30 °C e 150 °C a uma taxa de aquecimento de 2°C.min⁻¹. A temperatura de transição vítrea (T_g) das resinas foi determinada a partir do início do decaimento da curva do módulo de armazenamento.

Resultados e discussão

Tração. A Figura 3 mostra as curvas nominais tensão-deformação em tração para as resinas BVE-L e BVE; devido ao comportamento particularmente frágil da resina com lignina, só foi possível obter resultados para 4 dos 5 provetes extraídos da placa. Para os dois tipos de resina, as amostras apresentaram curvas características de um comportamento frágil, podendo este ser considerado praticamente linear até à rotura, com ligeira não linearidade (redução de rigidez) antes de ser atingida a tensão máxima. As curvas tensão-deformação de tração apresentaram desenvolvimento muito semelhante para ambas as bio-resinas, sendo, no entanto, notório que a resina BVE-L apresenta uma maior dispersão entre as curvas dos diferentes provetes, sendo tal refletido nos valores mais elevados de desvio padrão associados aos resultados apresentados na Tabela 2. A maior dispersão é explicada pela estrutura complexa da lignina, que pode apresentar variação entre as cadeias principais formadas durante a primeira etapa da síntese. Entretanto, apesar da maior variabilidade dos resultados, a adição de 4% (em peso) de lignina promoveu um aumento de +24% na resistência à tração da resina, juntamente com uma maior extensão na rotura (+0,64%), enquanto o módulo de elasticidade (E) permaneceu praticamente inalterado.

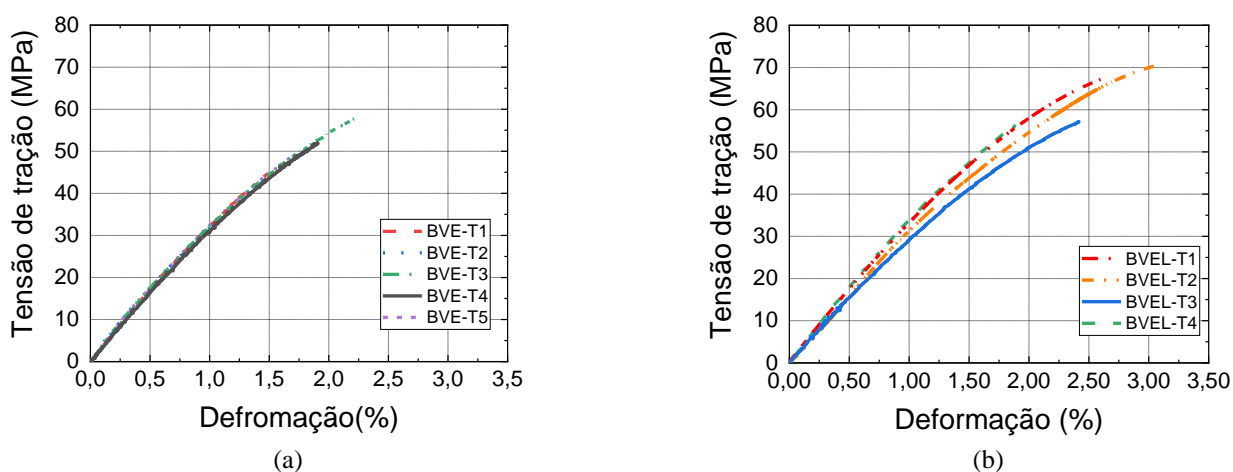


Figura 3: Curvas de tensão-deformação para os testes de tração das resinas (a) BVE-L e (b) BVE

Tabela 2: Resultados dos testes de tração às resinas (a) BVE-L e (b) BVE (\bar{x} , s e CoV correspondem respectivamente ao valor médio, desvio padrão e coeficiente de variação)

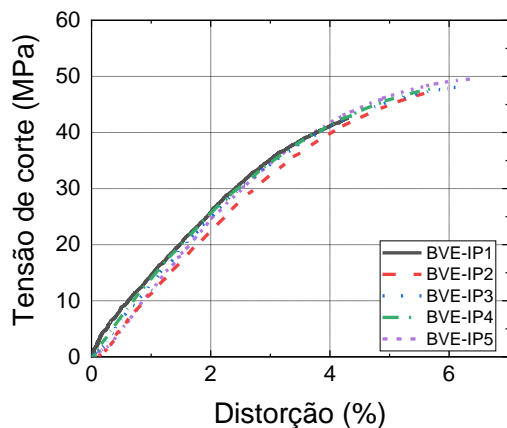
Provete	σ_{Max} [MPa]	E [GPa]	ε_{Max} [%]
BVE_T1	45,0	3,4	1,5%
BVE_T2	50,9	3,3	1,9%
BVE_T3	57,9	3,4	2,2%
BVE_T4	52,1	3,3	1,9%
BVE_T5	48,9	3,4	1,7%
\bar{x}	50,9	3,4	1,8%
σ	4,2	0,1	0,2%
v	8,3%	2,0%	13,1%

(a)

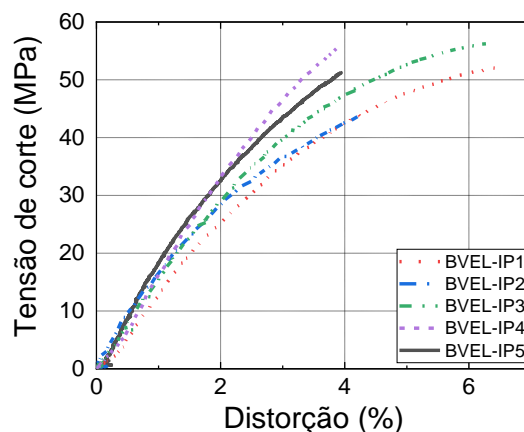
Provete	σ_{Max} [MPa]	E [GPa]	ε_{Max} [%]
BVE-L_T1	67,4	3,4	2,6%
BVE-L_T2	70,4	3,2	3,1%
BVE-L_T3	57,2	3,1	2,4%
BVE-L_T4	56,4	3,5	1,9%
BVE-L_T5	-	-	-
\bar{x}	62,9	3,3	2,5%
σ	6,1	0,2	0,4%
v	9,8%	5,6%	16,8%

(b)

Corte. A Figura 4 mostra as curvas de tensão de corte nominal-distorção de ambas as resinas para uma solitação de corte no plano. Tal como no teste de tração, a resina BVE-L apresentou uma maior dispersão dos resultados, conforme indicado na Tabela 3.



(a)



(b)

Figura 4: Curvas de tensão-deformação para os testes de corte no plano das resinas (a) BVE e (b) BVEL

A maior dispersão nas propriedades em corte no plano é novamente explicada pela estrutura complexa da lignina, que pode apresentar variação entre as cadeias principais formadas durante a primeira etapa da síntese. Entretanto, apesar da maior variabilidade, a adição de 4% (em peso) da lignina fez com que a resistência ao corte aumentasse 13%, tendo-se mantido aproximadamente constante os valores da distorção na rotura e do módulo de distorção (G).

Tabela 3: Resultados obtidos nos testes de corte às resinas (a) BVE-L e (b) BVE

Provete	τ [MPa]	G [GPa]	γ_{Max} [%]
BVE_T1	42,6	1,0	4,3
BVE_T2	47,2	1,1	5,7
BVE_T3	48,2	1,1	6,2
BVE_T4	47,8	1,0	5,7
BVE_T5	57,4	1,3	6,6
\bar{x}	47,1	1,1	5,7
σ	2,4	0,1	0,6
v	6,1%	16,2%	18,5%

(a)

Provete	τ [MPa]	G [GPa]	γ_{Max} [%]
BVE-L_T1	52,1	1,0	6,4%
BVE-L_T2	47,5	0,9	5,0%
BVE-L_T3	56,3	1,2	6,3%
BVE-L_T4	55,9	1,4	4,0%
BVE-L_T5	54,2	1,2	4,4%
\bar{x}	53,2	1,1	5,2%
σ	3,2	0,2	0,4%
v	9,9%	10,2%	13,0%

(b)

DMA. O ensaio de DMA foi utilizado para determinar as propriedades termomecânicas das resinas VE curadas e para avaliar, principalmente, o efeito dos grupos fenólicos presentes na lignina nos valores de temperatura de transição vítrea (T_g). A Figura 5 apresenta as curvas DMA para o módulo de armazenamento (E'), o módulo de perda (E'') e a $\tan \delta$ em função da temperatura. Em termos qualitativos, as curvas de E' apresentam o andamento tipicamente sigmoidal de resinas poliméricas, com um patamar no estado vítreo e uma redução acentuada devido ao processo de transição vítrea; já as curvas de E'' e $\tan \delta$ apresentam ambas um pico associado àquele processo. No que se refere ao efeito da incorporação da lignina, em relação às curvas de E' , nota-se que no caso da resina BVE-L o decaimento ocorre para temperaturas ligeiramente superiores por comparação com a resina BVE; por outro lado, e de forma consistente, os picos associados às curvas de E'' e $\tan \delta$ ocorrem igualmente para temperaturas superiores na resina BVE-L face à resina de base BVE.

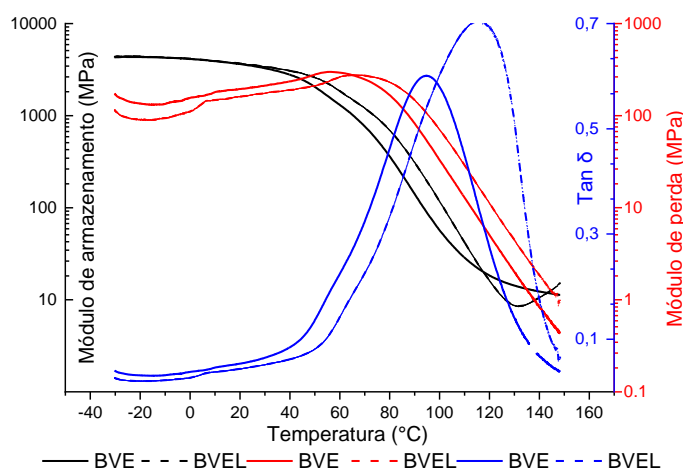


Figura 5: Curvas de DMA para as resinas BVE e BVEL

A Tabela 4 apresenta as estimativas da T_g associadas ao decaimento de E' e ao pico de $\tan \delta$ e, também, os valores de E' associados a diferentes temperaturas (25 °C, 50 °C e 125 °C). Os resultados obtidos mostram que, de facto, a T_g da resina BVE-L estimada com base no decaimento do E' apresentou um aumento de 8 °C face à resina BVE, potencialmente devido a uma maior cristalinidade das cadeias poliméricas da primeira resina; já a T_g estimada com base no pico da $\tan \delta$ apresentou um aumento de 17 °C. Adicionalmente, a resina BVE-L, tendo apresentado valores muito semelhantes de E' a temperatura ambiente face aos da resina BVE (2% superiores na primeira resina), evidenciou reduções de E' muito menos acentuadas ao longo da transição vítrea até 120 °C, o que é bem patente nos valores a 50 °C, 26% superiores na resina BVE-L. De facto, entre os 25 °C e 50 °C, a resina BVE apresentou uma redução do E' de 41%, enquanto na resina BVE-L essa redução foi 28%. A partir de 120 °C, a redução de E' verificada para a resina BVE-L tornou-se mais acentuada; no entanto, a esta temperatura o módulo de armazenamento é considerado residual.

Tabela 4: Resultados extraídos dos ensaios de DMA

Resina	T_g [°C]		E' [MPa]		
	Decaimento E'	$\tan \delta$	25 °C	50 °C	125 °C
BVE-L	63	112	3549	2584	11
BVE	55	95	3473	2052	16

TGA. A Figura 6 apresenta o TGA para ambas as resinas, as curvas são semelhantes, sendo que as temperaturas de degradação da resina BVEL são ligeiramente superiores as da resina BVE.

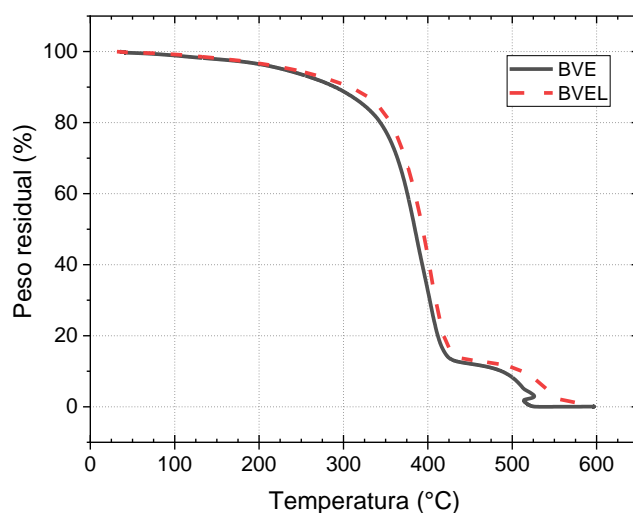


Figura 6: Curvas de TGA para as resinas BVEL e BVE

Ambas as curvas apresentam um decaimento moderado até os 200 °C, acentuando-se entre os 200 e 300 °C e a taxa de perda de massa é mais acentuada a partir dos 300 °C. A temperatura de decomposição (T_d) foi considerada para a perda de 50% da massa, sendo de 384 °C e de 393 °C para a VBE e BVEL respetivamente.

A inconsistência observada nas curvas por volta dos 500 °C deve-se ao fato da análise ter sido feita em atmosfera de ar sintético e provavelmente ter havido combustão em presença de oxigênio, o que resulta numa perturbação da análise por liberação de fumo, dado o ligeiro arrefecimento do sistema.

Considerações finais

Este artigo apresentou uma comparação entre os comportamentos mecânico e termomecânico de duas bio-resinas do tipo vinil éster, em que uma delas contém a adição de uma pequena fração (0,1 mol - 4% w/w) de lignina. Tal incorporação de lignina proporcionou aumentos de 24% na resistência à tração e 13% na resistência ao corte, e um aumento de 8 °C na T_g estimada com base no módulo de armazenamento. Entretanto, por se tratar de um bio-polímero de cadeia complexa (constituído por anéis fenólicos), a variabilidade nas propriedades desta resina (com lignina) observada nos diferentes ensaios foi significativamente superior à da resina de base (sem lignina). Para além disso, só foi possível curar a resina com lignina a temperatura de 80 °C.

Em termos gerais, os resultados obtidos mostram que, mesmo em pequena quantidade, a lignina promoveu modificações significativas nas propriedades mecânicas e termomecânicas da bio-resina desenvolvida, realçando o potencial deste monómero para o desenvolvimento de bio-resinas de elevado desempenho.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ANI e à FCT o financiamento concedido aos projetos BioLam (POCI-01-0247-FEDER-039769 LISBOA) e EcoComposite (PTDC/ECI-EGC/29597/2017), respetivamente. A primeira autora agradece à FCT o financiamento concedido para a sua bolsa de doutoramento (SFRH/BD/04675/2020).

Referências

- [1] L. Lima, E. Trindade, L. Alencar, M. Alencar, L. Silva, *Sustainability in the construction industry: A systematic review of the literature*, J. Clean. Prod. 289 (2021). <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.125730>.

- [2] A short guide to the Construction Resources and Waste Roadmap, (n.d.).
- [3] F.O. Sonmez, *Optimum Design of Composite Structures: A Literature Survey (1969–2009)*, J. Reinf. Plast. Compos. 36 (2016) 3–39. <https://doi.org/10.1177/0731684416668262>.
- [4] M. Asim, N. Saba, M. Jawaid, M. Nasir, M. Pervaiz, O. Y. Alothman, *A review on Phenolic resin and its Composites*, Curr. Anal. Chem. 13 (2017) 185–197. <https://doi.org/10.2174/1573411013666171003154410>.
- [5] S. Aggarwal-Khan, *How can a life-cycle approach curb the plastic pollution crisis?*, (2022).
- [6] C. Li, X. Zhao, A. Wang, G.W. Huber, T. Zhang, *Catalytic Transformation of Lignin for the Production of Chemicals and Fuels*, Chem. Rev. 115 (2015) 11559–11624. https://doi.org/10.1021/ACS.CHEMREV.5B00155/ASSET/IMAGES/MEDIUM/CR-2015-00155G_0039.GIF.
- [7] A. Alzagameem, B. El Khaldi-Hansen, B. Kamm, M. Schulze, *Lignocellulosic biomass for energy, biofuels, biomaterials, and chemicals*, Biomass Green Chem. Build. a Renew. Pathw. (2017) 95–132. https://doi.org/10.1007/978-3-319-66736-2_5/COVER.
- [8] H. Pan, *Synthesis of polymers from organic solvent liquefied biomass: A review*, Renew. Sustain. Energy Rev. 15 (2011) 3454–3463. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.05.002>.
- [9] C.E. Bakis, L.C. Bank, Vl. Brown, E. Cosenza, J.F. Davalos, J.J. Lesko, A. Machida, S.H. Rizkalla, T.C. Triantafillou, *Fiber-reinforced polymer composites for construction-state-of-the-art review*, J. Compos. Constr. 6 (2002) 73–87.
- [10] K.M. Davis, M. Rover, R.C. Brown, X. Bai, Z. Wen, L.R. Jarboe, *Recovery and Utilization of Lignin Monomers as Part of the Biorefinery Approach*, Energies 2016, Vol. 9, Page 808. 9 (2016) 808. <https://doi.org/10.3390/EN9100808>.
- [11] E. Frollini, C.G. Silva, E.C. Ramires, *Phenolic resins as a matrix material in advanced fiber-reinforced polymer (FRP) composites*, 2013. <https://doi.org/10.1533/9780857098641.1.7>.
- [12] D.M. Trinowski, *Phenolic Resins: A Century of Progress*, Phenolic Resins A Century Prog. (2010) 451–502.
- [13] R. Galhano dos Santos, N.F. Acero, S. Matos, R. Carvalho, M. Vale, A.C. Marques, J.C. Bordado, M.M. Mateus, *One-Component Spray Polyurethane Foam from Liquefied Pinewood Polyols: Pursuing Eco-Friendly Materials*, J. Polym. Environ. 26 (2018) 91–100. <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0931-z>.
- [14] R.G. Dos Santos, R. Carvalho, E.R. Silva, J.C. Bordado, A.C. Cardoso, M. Do Rosário Costa, M.M. Mateus, *Natural polymeric water-based adhesive from cork liquefaction*, Ind. Crops Prod. 84 (2016) 314–319. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2016.02.020>.
- [15] J.C. Domínguez, M. Oliet, M. V. Alonso, E. Rojo, F. Rodríguez, *Structural, thermal and rheological behavior of a bio-based phenolic resin in relation to a commercial resol resin*, Ind. Crops Prod. 42 (2013) 308–314. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2012.06.004>.
- [16] J. Van Haveren, E.A. Oostveen, F. Micciché, B.A.J. Noordover, C.E. Koning, R.A.T.M. Van Benthem, A.E. Frissen, J.G.J. Weijnen, *Resins and additives for powder coatings and alkyd paints, based on renewable resources*, J. Coatings Technol. Res. 4 (2007) 177–186. <https://doi.org/10.1007/s11998-007-9020-5>.
- [17] A. Gardziella, L.A. Pilato, A. Knop, *Phenolic Resins*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2000. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-04101-7>.
- [18] L. Pilato, *Phenolic resins: A century of progress*, 2010. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-04714-5>.

- [19] M.A. Hofmann, A.T. Shahid, M. Garrido, M.J. Ferreira, J.R. Correia, J.C. Bordado, *Biobased Thermosetting Polyester Resin for High-Performance Applications*, ACS Sustain. Chem. Eng. 10 (2022) 3442–3454. https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.1C06969/ASSET/IMAGES/LARGE/SC1C06969_0008.JPEG.
- [20] M. Vale, M.M. Mateus, R. Galhano dos Santos, C. Nieto de Castro, A. de Schrijver, J.C. Bordado, A.C. Marques, *Replacement of petroleum-derived diols by sustainable biopolyols in one component polyurethane foams*, J. Clean. Prod. 212 (2019) 1036–1043. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.088>.
- [21] Y. Noh, T. Odimeyomi, S.M. Teimouri Sendesi, J.P. Youngblood, A.J. Whelton, *Environmental and human health risks of plastic composites can be reduced by optimizing manufacturing conditions*, J. Clean. Prod. 356 (2022) 131803. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2022.131803>.

Estudo de parâmetros mecânicos de dois solos arenosos estabilizados com cimento

PEREIRA Luís^{1, a}, BRANCO Fernando G.^{1, b}, OLIVEIRA Paulo da Venda^{1, c} e ANDRADE Pedro Santarém^{2, d}

¹Universidade de Coimbra, ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Portugal

² Universidade de Coimbra, Centro de Geociências, Departamento de Ciências da Terra, Portugal

^alfmpereira@uc.pt, ^bfjbranco@dec.uc.pt, ^cpjvo@dec.uc.pt, ^dpandrade@dct.uc.pt

Palavras-chave: solo-cimento, estabilização, comportamento mecânico, água.

Resumo. O solo é o material natural de construção mais abundante na natureza e detém muitas vezes propriedades excelentes que o tornam apetecível enquanto material de construção: é resistente, esteticamente agradável, plástico, e tem um baixo custo. Sendo uma das metas primordiais de uma obra a racionalização de custos, a utilização dos solos existentes no local é, desde há muito tempo, um objetivo apetecível. No entanto, nem todos os solos, devido a fatores tais como a granulometria, a composição mineralógica ou a presença de matéria orgânica, se comportam de modo aceitável em termos mecânicos. A adição de cimento Portland modifica as propriedades dos solos através de processos físico-químicos entre os grãos do solo e o cimento, promovendo a formação de um esqueleto que cimenta e envolve os grãos. Neste trabalho estudou-se a melhoria de dois solos através da estabilização com cimento Portland. Os resultados obtidos permitiram concluir que o comportamento mecânico melhorou com o tempo de cura dos provetes e com o aumento do teor de ligante. Foi ainda possível definir uma razão entre a resistência à compressão diametral e a resistência à compressão uniaxial simples. Determinou-se que existe um teor em água “ótimo” que permite obter um comportamento mecânico mais competente. Concluiu-se que existe uma razão água/cimento (w/c) “ótima” para cada teor de ligante, e que esta tende a diminuir com o aumento deste último.

Introdução

O aumento da população mundial e conseqüente desenvolvimento das sociedades modernas criou uma tendência migratória no sentido dos grandes centros populacionais. Este facto teve como conseqüência um aumento premente da necessidade de se criarem todo o tipo de infraestruturas que facultassem alojamento e promovessem a facilidade de deslocação e o armazenamento de recursos naturais que contribuam para uma melhoria da qualidade de vida. Qualquer obra de engenharia tem como objetivo primordial a contenção de custos, apenas possível se se tiver também a preocupação de se encontrarem técnicas atrativas tanto do ponto de vista económico como ambiental. A utilização de solos existentes em obra ou nas proximidades desta ajuda a uma racionalização de custos e reduz os impactos ambientais resultantes da exploração e transporte desses materiais ao longo de grandes distâncias. Adicionalmente, a aplicação do que seria um resíduo a descartar num novo material de construção contribui para a transição para uma circularidade de recursos, que atualmente se pretende sistémica e global. A crescente noção de que habitamos um planeta com recursos finitos exige que se abandone progressivamente o uso e descarte de bens e recursos (economia linear) [1]. Globalmente, as obras de construção civil consomem cerca de 75% dos recursos naturais extraídos da natureza sendo que a construção de edifícios utiliza 40% dos recursos minerais, 40% da energia e 16% da água consumidos anualmente. Em Portugal, o sector da construção produz anualmente cerca de 7,5 milhões de toneladas de resíduos sólidos [2].

O solo é o material de construção natural mais abundante no planeta. Para Matos Fernandes [3], o solo é formado por partículas minerais, que resultaram da desintegração física e da decomposição

química das rochas, podendo também conter matéria orgânica. Os espaços não ocupados pelas partículas são designados por poros ou vazios. Estes podem conter água e ar, de forma isolada ou conjuntamente. Quando os poros estão integralmente preenchidos por água diz-se que o solo está saturado. O solo é detentor de características que o tornam atrativo enquanto material de construção. Este material é resistente, muitas vezes esteticamente agradável, plástico e barato. Wang [4] refere que a primeira utilização de solo estabilizado com cimento terá ocorrido aquando da construção de uma estrada nos Estados Unidos da América, na Florida, em 1915. Atualmente, as misturas de solo-cimento são aplicadas em variadas situações, desde construção de taludes, proteção de leitos de cursos de água [5], bases e sub-bases para pavimentos [6][7], aterros de caminhos de ferro e autoestradas [8], em fundações superficiais [9], camadas de impermeabilização [10], no fabrico de tijolos e blocos para alvenaria, ou até na construção de edifícios [11].

No presente trabalho, estudou-se a melhoria de dois solos através da estabilização com cimento Portland. Realizaram-se testes de caracterização dos materiais estudados, tendo posteriormente sido realizados ensaios no sentido de avaliar o desempenho de provetes de solo melhorado quando sujeito a ensaios de compressão simples e diametral. O presente documento descreve os procedimentos adotados, bem como os resultados obtidos.

Materiais utilizados

Solos.

- Solo_Coimbra

Solo de cariz arenoso que foi utilizado na definição da melhor metodologia de compactação.

- Solo_Leiria

Recolhido na zona de Leiria, na parte inferior de um talude exposto a Sudeste, entre os lugares de Pousos e Marrazes. Enquadra-se, em termos geológicos, na Orla Sedimentar Ocidental da Península Ibérica. A análise da área circundante permitiu identificar este solo como pertencendo ao Pliocénico de fácies continental [12]. A Figura 1 mostra o local de recolha do Solo_Leiria.

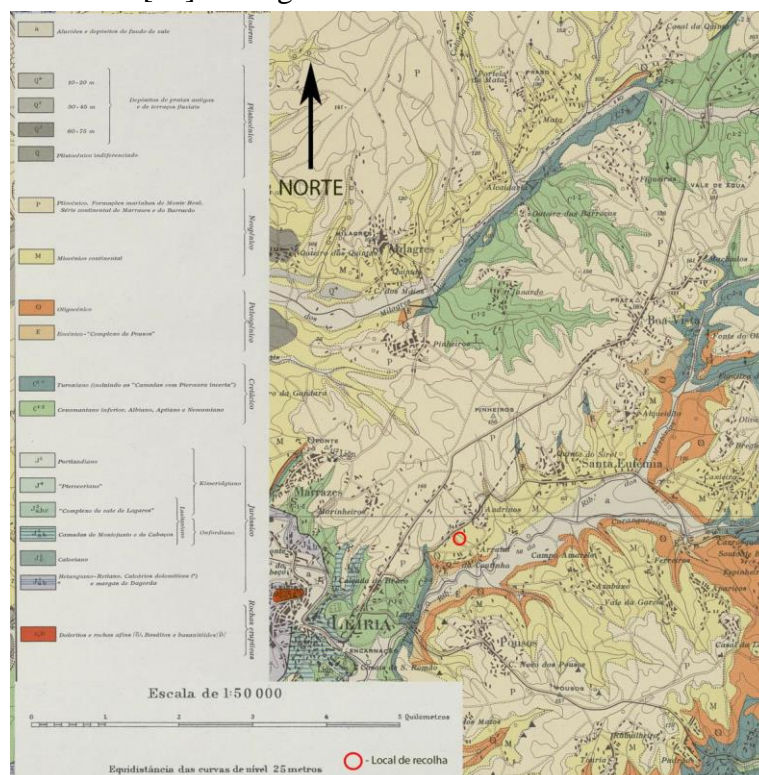


Figura 1: Pormenor do ponto de recolha do Solo_Leiria, na carta geológica 23-C (Leiria).

Cimento e água. Neste estudo foi utilizado cimento tipo Portland CEM II B/L 32,5N. Foi utilizada água canalizada da rede pública de abastecimento.

Programa Experimental

Os objetivos deste estudo foram os de avaliar a influência do teor em cimento e do teor em água no comportamento mecânico da mistura de solo-cimento, através da realização de ensaios de compressão uniaxial simples (UCS) e de compressão diametral (CD). Inicialmente, realizaram-se ensaios de identificação e caracterização, nomeadamente análise granulométrica, limites de Atterberg, e o ensaio Proctor, a ambos os solos. Numa primeira fase, foram preparados 18 provetes utilizando o Solo_Coimbra. Na preparação desses provetes, utilizaram-se três métodos de compactação diferentes, o Proctor leve (PL), o Proctor pesado (PP), e o método da compactação por apiloamento (AP). Assim, foram preparados três provetes para cada tipo de ensaio e por metodologia de compactação, um para ensaiar aos sete dias de idade (P1), e dois para ensaiar aos vinte e oito dias de idade (P1 e P2). Os provetes todos foram identificados com a numeração do provete, seguida do tipo de compactação, data de ensaio e finalmente o tipo de ensaio (ex: P1_AP_7D_CS). Os provetes foram descofrados no dia seguinte à sua preparação, armazenados em câmara húmida, e ensaiados aos 7 e aos 28 dias de cura. Tal como já referido, o objetivo desta fase de ensaios visava identificar, com base nos resultados da resistência mecânica obtidos, qual o método de compactação mais eficaz para este tipo de provetes. A Tabela 1 apresenta o programa experimental executado neste estudo.

Tabela 1: Programa experimental adotado neste estudo.

Fase do programa experimental	Material	Ensaio	Nº de ensaios realizados
Caracterização do material	Solo_Coimbra	Análise Granulométrica	1
		Limite de Plasticidade	Não plástico
		Limite de Liquidez	Não plástico
		Ensaio Proctor	2
	Solo_Leiria	Análise Granulométrica	1
		Limite de Plasticidade	Não plástico
		Limite de Liquidez	Não plástico
		Ensaio Proctor	1
Resistência Mecânica	Solo_Coimbra – (Fase 1)	Compressão Simples	9
		Compressão Diametral	9
	Solo_Leiria – (Fase 2)	Compressão Simples	75
		Compressão Diametral	75

Na 2ª fase do programa experimental, prepararam-se cento e cinquenta provetes com o método de compactação determinado na 1ª fase definido como o mais adequado (compactação Proctor Leve). A Tabela 2 mostra a quantidade de provetes produzidos para cada teor de cimento (30 provetes), tipo de ensaio (compressão simples (CS) e compressão diametral (CD) e (sete dias (7D) e vinte e oito dias (28D)). Assim, por exemplo, CS28D corresponde a um provete ensaiado em compressão simples, com idade de 28 dias. Para além destes provetes, foram ainda preparados provetes para 8, 10, 12 e 14% de teor de cimento, totalizando 150 provetes. Mais uma vez, todos os provetes foram inequivocamente identificados com o número do provete, seguido do teor em cimento, teor em água, tempo de cura e finalmente com a tipologia de ensaio (ex: P1_12C_11H_7D_CD).

Tabela 2: Exemplo de quantidades de provetes preparados para um teor de cimento (CEM) de 6%.

% de CEM	% de Água	Tipo de ensaio e tempo de cura			
		CS7D	CD7D	CS28D	CD28D
6	7	1	1	2	2
	9	1	1	2	2
	11	1	1	2	2
	13	1	1	2	2
	15	1	1	2	2

Identificação e caracterização dos solos. Foram realizados ensaios de identificação e caracterização dos solos, nomeadamente a análise granulométrica seguindo a norma LNEC E 239 [13], limites de Atterberg, seguindo as indicações da norma NP 143 [14], e o ensaio Proctor [15].

Com base nos resultados de alguns destes ensaios, os dois solos deste estudo foram classificados segundo as duas classificações mais utilizadas no nosso país, a especificação LNEC E 240 – 1970 – “Solos. Classificação para fins rodoviários” [16], e a norma ASTM D 2487 – 00 – “Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)” [17].

Análise dos resultados

Análise granulométrica. A figura 2 apresenta as análises granulométricas realizadas aos solos estudados neste trabalho.

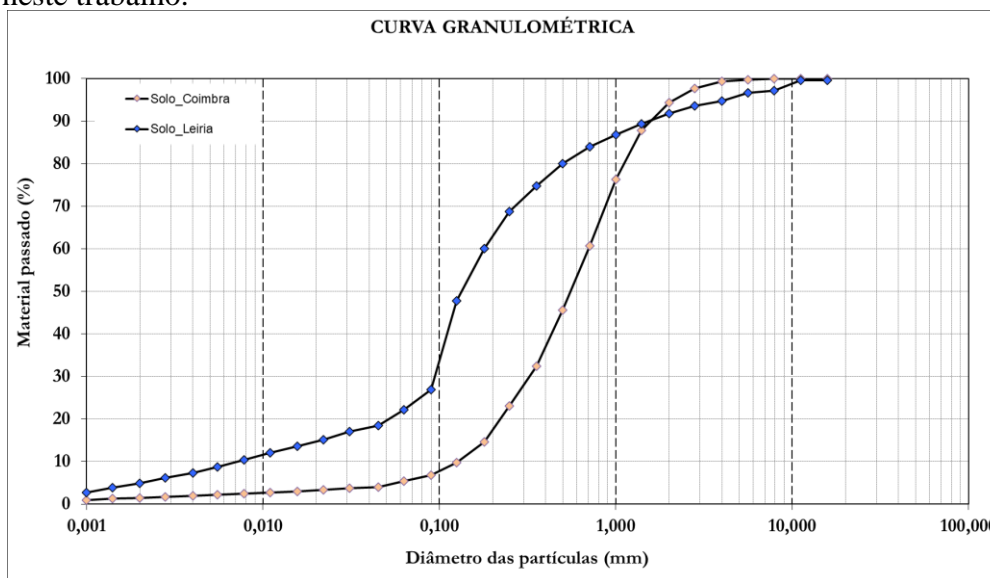


Figura 2: Análises granulométricas dos solos estudados neste trabalho.

Do gráfico da Figura 2, retira-se que o Solo_Coimbra é composto por cerca de 82,5% de partículas de dimensão areia (0,075 – 2mm), e por cerca de 17% de partículas de dimensão cascalho (neste caso concreto, de 2mm a 25,4mm). A percentagem de partículas de dimensão inferior a 0,075mm (silte e argila), é de cerca de 0,8%. Já o Solo_Leiria compreende cerca de 8,24% de partículas de dimensão cascalho, 69% de partículas arenosas, 17% de partículas siltosas, e 5,5% de partículas argilosas.

Limites de consistência. Uma vez que ambos os solos estudados não contêm pelo menos 30% em massa de partículas com dimensão inferior a 0,05 mm, foram considerados não plásticos.

Ensaio Proctor. A Figura 3 apresenta a curva de baridade seca máxima versus teor em água para ambos os solos.

Da análise da figura 3 verifica-se que, para o Solo_Coimbra, o teor em água que permite atingir a baridade seca mais elevada de 18,57 kN/m³, é de 11,1%. Já para o Solo_Leiria, o ensaio Proctor permitiu definir o teor em água ótimo de 8,63%, que permitiu alcançar uma baridade seca máxima de 18,67 kN/m³.

Comparação da baridade seca máxima do solo não ligado com as diferentes misturas

Na Figura 4 é possível observar a curva de compactação do Solo_Leiria, assim como as características dos provetes moldados com as diferentes percentagens de ligante.

Analisando Figura 4, pode concluir-se que a influência do ligante é muito importante na baridade seca da mistura solo-cimento. À esquerda do teor em água ótimo determinado no ensaio Proctor (8,63%), a água que no solo não estabilizado exerce um efeito de redução do atrito entre as partículas do solo permitindo uma compactação mais eficaz (e crescente à medida que se vai aumentando o teor em água até pico da curva) é reclamada pelos constituintes do cimento. Uma consequência é a de muitos dos provetes preparados com 7% (e mesmo alguns com 9%) de teor em água não atingirem valores tão elevados de peso volúmico seco como o do solo não tratado. Outra

consequência é a do deslocamento do pico de compactação ótimo das misturas de solo-cimento para a direita e para cima da curva do solo não estabilizado, para valores de γ_s a rondar os 20,5 a 20,9 kN/m^3 , e um correspondente teor em água ótimo próximo dos 13%-13,5%.

Isto deve-se provavelmente à incorporação das partículas de cimento, mais finas, na mistura, e à sua densidade mais elevada.

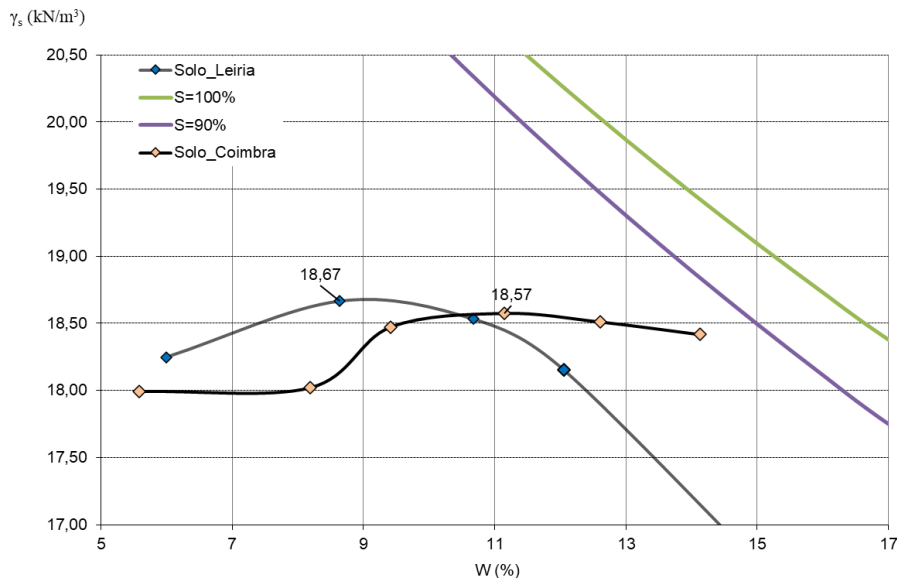


Figura 3: Resultados dos ensaios de compactação leve realizados no Solo_Coimbra e Solo_Leiria.

Classificação dos solos

Especificação LNEC E240 – 1970 – “Solos. Classificação para fins rodoviários”. Analisando as curvas granulométricas do Solo_Coimbra em pontos-chave como o são a percentagem acumulada de material passada nos peneiros 2 mm (nº10), 0,425 mm (nº 40), e 0,075 mm (nº 200), verifica-se que o solo se enquadra no grupo A-1-b do quadro “Classificação de Solos” do anexo da especificação LNEC E 240 – 1970.

Projetando a percentagem de material passado no peneiro com malha de 0,075 mm (nº 200) nos dois ábacos em anexo da mesma especificação, chegamos ao índice de grupo deste material: 0. Deste modo, o Solo_Coimbra é classificado como A-1-b (0), sendo o material característico deste subgrupo uma “areia grossa, com ou sem material aglutinante bem graduado”, prevendo-se um comportamento na camada sob o pavimento de “excelente a bom”.

Analisando a curva granulométrica do Solo_Leiria nos mesmos pontos chave, classificou-se este solo como A-2-4 (0). Este subgrupo é constituído por vários materiais granulares contendo 35% ou menos de partículas com dimensão inferior a 0,074 mm. Para além disso, a fração que passa no peneiro 0,420 mm é não plástica. Prevê-se um comportamento na camada sob o pavimento de “excelente a bom”.

Classificação unificada dos solos. Para classificar o Solo_Coimbra seguindo as diretrizes desta norma, é então necessário analisar a curva granulométrica. Atendendo a que mais de 50% do solo passa no peneiro 4,75 mm (passa cerca de 95% do solo), e que o C_u é inferior a 6 ($C_u=5$) e o C_c se situa entre 1 e 3 ($C_c=1,11$), o solo é classificado com o nome de grupo SP-SM – areia mal graduada com silte.

Analisando a curva granulométrica do Solo Leiria, e atendendo ao facto de que cerca de 76% do solo fica retido no peneiro com malha de 0,075mm, o solo é inicialmente enquadrado como “solo grosseiro”. Uma vez que, da fração retida no peneiro de 0,075mm, cerca de 75% passa no peneiro com malha de 4,75mm, o solo é enquadrado como sendo uma areia. Finalmente, como passam mais de 12% de partículas no peneiro com malha de 0,075mm, e os finos apresentam características (de

acordo com a ASTM 2488) que se encaixam na categoria de “silte”, o solo é classificado como SM – areia com silte.

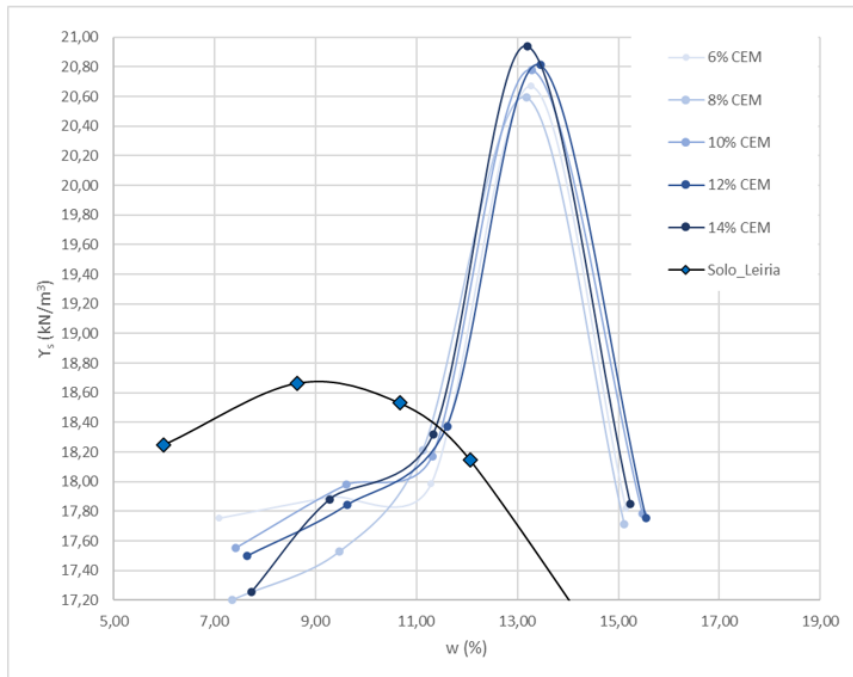


Figura 4: Peso volúmico dos provetes moldados com solo estabilizado (compactados) e Proctor do solo não estabilizado.

Resistência mecânica

Efeito do teor em água na resistência à compressão. Apresentam-se os resultados da resistência à compressão em função do teor em água final, para os diferentes teores em cimento. A Figura 5 ilustra a evolução da resistência à compressão simples em função do teor em água para diversos teores em cimento e tempos de cura.

Da análise da Figura 5, verifica-se que o teor em água final ao qual corresponde uma resistência à compressão simples mais elevada se situa entre os 9% e os 10%, sendo que estes provetes foram inicialmente preparados com um teor em água de 11%. Conclui-se que a crescente disponibilidade de água na mistura até esses valores percentuais exerce um papel positivo na evolução da resistência à compressão simples, possibilitando a gênese de um maior número de ligações entre os minerais hidratados do cimento e as partículas do solo. Acima destes teores “ótimos”, a quantidade de água na mistura é excessiva, diminuindo provavelmente a densidade das ligações entre os minerais hidratados do ligante e o solo, traduzindo-se em resultados de compressão uniaxial simples mais reduzidos.

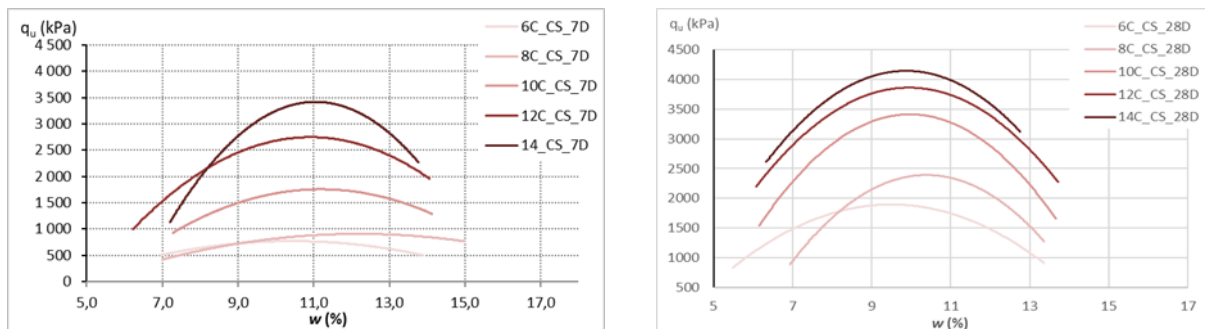


Figura 5: Evolução da resistência à compressão simples (CS) aos 7 dias e 28 dias de idade.

A Figura 6 mostra a resistência à tração obtidas em ensaio de compressão diametral para diversos teores em água, teores em cimento e tempos de cura.

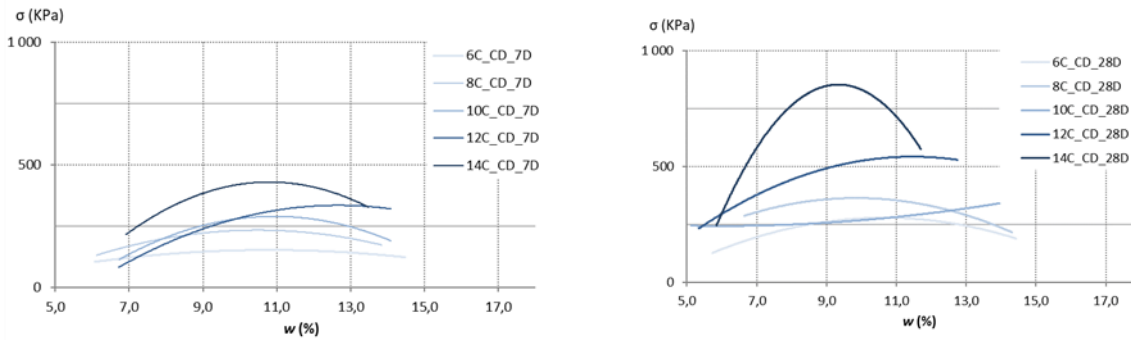


Figura 6: Evolução da resistência à compressão diametral (CD) aos 7 dias e 28 dias de idade.

Apesar de, naturalmente, se verificarem resultados mais dispersos, sendo, por vezes, difícil definir um teor em água ao qual corresponda um comportamento mecânico mais competente, a análise dos gráficos permite concluir que existe um teor em água “ótimo” da mistura que permite a obtenção dos melhores resultados na resistência à compressão diametral. Este teor em água situa-se cerca dos 9%-11%, e demonstra, tal como mencionado nos ensaios de compressão uniaxial simples, que a crescente disponibilidade de água na mistura até aos valores “ótimos” de teor em água influencia de modo positivo a evolução da resistência à compressão diametral, culminando num maior número de ligações entre os minerais hidratados do cimento e as partículas do solo. A partir de certa altura (valores de teor em água acima dos 12%), a quantidade de água na mistura é demasiada, diminuindo provavelmente a densidade das ligações entre os minerais hidratados do ligante e o solo, refletindo-se nos valores mais baixos obtidos neste ensaio.

Relação entre a resistência à compressão diametral e a resistência à compressão simples

Para o presente estudo, foi possível determinar uma razão entre a resistência à compressão diametral e a resistência à compressão uniaxial simples. Este valor é de 0,16, sendo semelhante aos valores obtidos por Consoli et al. [18] (aproximadamente 0,15), para uma areia oriunda de Porto Alegre, no Brasil (areia de Osorio). Segundo o mesmo autor, esta relação é útil para definição de metodologias de dosagem, uma vez que os critérios racionais podem basear-se nos resultados de um destes ensaios, dada a sua interdependência. Os resultados estão patentes na figura 7. Na figura estão representadas as relações entre σ/q_u , para todas as percentagens de cimento e de água, por exemplo: a primeira coluna cinzenta representa a relação σ/q_u calculada a partir da média de todos os provetes preparados com um teor de cimento de 6% (e todos os teores em água). A primeira coluna a azul representa a relação σ/q_u calculada a partir da média de todos os provetes preparados com um teor de água de 7% (e todos os teores de cimento).

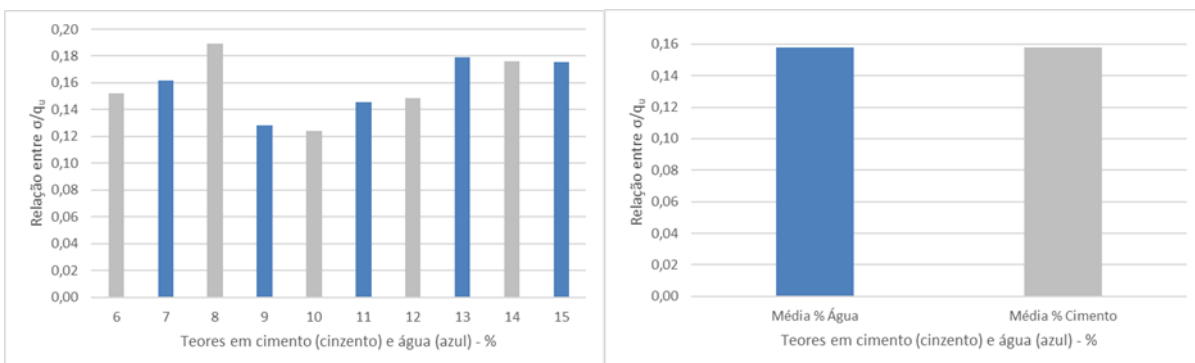


Figura 7: Médias das relações entre σ/q_u , por teores em cimento (a cinzento), e por teores em água (a azul). À esquerda, as médias por cada teor em cimento e por cada teor em água, e à direita, a média de todos os teores em cimento (a cinzento), e a média de todos os teores em água (a azul).

Conclusões

A análise detalhada do Solo_Leiria demonstrou que é um solo não problemático e com características razoáveis para utilização em obras de engenharia.

Os maiores pesos volúmicos secos de todas as misturas de solo-cimento deste estudo (6% a 14%) são alcançados com teores em água iniciais entre 13% e 13,5%.

Tanto a resistência à compressão simples, como a resistência à tração aumentam com o incremento do tempo de cura.

UCS - Os ensaios realizados neste estudo mostraram que os provetes preparados com um teor em água de 11% revelaram um comportamento mecânico mais competente. Aquando do ensaio, estes provetes apresentavam um teor em água que se situava entre os 9% e os 10% e, para os teores em cimento mais elevados (10%, 12% e 14%) atingiram-se valores de resistência à compressão simples que rondam os 4000 kPa. Verifica-se ainda que, ao contrário do que é habitual no betão, os valores de resistência à compressão simples aos 7 dias de cura são muito inferiores aos valores observados em provetes de betão (75% do valor expectável aos 28 dias de cura). De facto, a resistência à compressão simples aos 7 dias de cura atinge cerca de 50% dos valores obtidos nos ensaios aos provetes com 28 dias de cura.

CD - Os ensaios de compressão diametral mostraram, tal como era expectável, uma maior variabilidade de resultados. Não obstante, verificou-se também que os teores em água “ótimos” para um solo com estas características se situam entre os 9%-11%.

Acima destes valores, em particular nos provetes com um teor em água de 15% verificou-se, invariavelmente, um decréscimo da resistência à compressão diametral. A incoerência dos valores foi mais visível nos provetes preparados com um teor em cimento mais baixo (6% e 8%), nos quais alguns dos provetes com 28 dias mostraram um comportamento semelhante e até mesmo inferior a alguns provetes com 7 dias.

Foi possível determinar uma razão entre a resistência à compressão diametral e a resistência à compressão uniaxial dos provetes estabilizados de 0,16.

Considerações finais

Neste trabalho estudou-se a melhoria de dois solos através da estabilização com cimento Portland. Os resultados obtidos permitiram concluir que o comportamento mecânico melhorou com o tempo de cura dos provetes e com o aumento do teor de ligante. Foi ainda possível definir uma razão entre a resistência à compressão diametral e a resistência à compressão uniaxial simples. Determinou-se que existe um teor em água “ótimo” que permite obter um comportamento mecânico mais competente. Concluiu-se que existe uma razão água/cimento (w/c) “ótima” para cada teor de ligante, e que esta tende a diminuir com o aumento deste último.

Agradecimentos

Este trabalho foi parcialmente financiado pela FCT/MCTES através de fundos nacionais (PIDDAC) no âmbito da Unidade de I&D Instituto de Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas (ISISE), sob a referência UIDB/04029/2020, e pelos fundos FEDER através do CENTRO 2020, PORTUGAL 2020, no âmbito do projeto CENTRO-01-0247-FEDER-047067 (Life4stone).

Referências

- [1] M. De Wit, *The CIRCULARITY GAP report*, no. January, 2018.
- [2] J. P. Teixeira, M. Pereira, and J. A. Teixeira, *Circular Economy in the Civil Construction Sector I*, Lisbon and Tagus Valley Regional Coordination and Development Commission, 2019.
- [3] M. de Matos Fernandes, *Mecânica dos Solos, Conceitos e Princípios Fundam.*, vol. 1, p. 3, 2006.

- [4] G. Zhang, C. Chen, Y. Zhang, H. Zhao, Y. Wang, and X. Wang, *Optimised neural network prediction of interface bond strength for GFRP tendon reinforced cemented soil*, *Geomech. Eng.*, vol. 28, no. 6, pp. 599–611, 2022, doi: DOI: <https://doi.org/10.12989/gae.2022.28.6.599>.
- [5] N. I. D. USACE, *US Army Corps of Engineers National Inventory of Dams*, 2000.
- [6] D. Foppa, *ANÁLISE DE VARIÁVEIS-CHAVE NO CONTROLE DA RESISTÊNCIA MECÂNICA DE SOLOS ARTIFICIALMENTE CIMENTADOS ANÁLISE DE VARIÁVEIS-CHAVE NO CONTROLE DA*, 2005.
- [7] ACI, *ACI 230.1R-09. Report on Soil Cement - American concrete institute*, 2009.
- [8] O. G. Ingles and J. B. Metcalf, *Soil stabilization principles and practice*, 1972.
- [9] P. J. V Oliveira, A. A. S. Correia, J. Teles, and D. G. Custódio, *Effect of fibre type on the compressive and tensile strength of a soft soil chemically stabilised*, *Geosynth. Int.*, vol. 23, no. 3, pp. 171–182, 2016.
- [10] J. Carreto, L. Caldeira, and E. Maranha das Neves, *Processes Involved in the Formation and Performance of Self-Hardening Slurry Walls: Santa Clara-a-Velha Monastery Cutoff Wall*, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 142, no. 7, p. 4016019, 2016.
- [11] T. V Lima, *Study of the production of soil-cement blocks with raw materials from the urban core of the city of Campos dos Goytacases-RJ*, Master's Thesis, Science and Technology Center/UENF Campos dos Goytacases ..., 2006.
- [12] C. Teixeira, G. Zbyszewski, C. T. de Assunção, and G. Manuppella, *Geological map of Portugal on the scale of 1/50000: Explanatory notice of the geological map 23-C, Leiria*. Geological Services of Portugal, 1968.
- [13] LNEC, *LNEC E 239 - Análise Granulométrica Por Peneiração Húmida*. Portugal, 1970.
- [14] NP 143, *Determinação dos limites de consistência*, 143, 1969
- [15] E-197-66-PROCTOR.
- [16] LNEC:240, *E 240 (1971)-Soils*, 1970
- [17] ASTM D2487, *ASTM:2487 -0, Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*, 2003.
- [18] N. C. Consoli, R. C. Cruz, M. F. Floss, and L. Festugato, *Parameters controlling tensile and compressive strength of artificially cemented sand*, *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 136, no. 5, pp. 759–763, 2010, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000278](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000278).

Avaliação de desempenho de argamassas auto-compactáveis com óxido de grafeno

JUNIOR Ibraim^{1,a}, SILVA Pedro Raposeiro^{1,2,b*} e EVANGELISTA Luís^{1,2,c}

¹Departamento de Engenharia Civil / Instituto Superior de Engenharia de Lisboa / Instituto Politécnico de Lisboa, Rua Conselheiro Emídio Navarro, 1, 1959-007 Lisboa – Portugal

²CERIS Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability, Instituto Superior Técnico / Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1049-001 Lisboa – Portugal

^aibraim_junior@hotmail.com, ^bsilvapm@dec.isel.pt, ^cevangelista@dec.isel.pt

Palavras-chave: Argamassas auto-compactáveis, Óxido de grafeno, Comportamento mecânico, Durabilidade.

Resumo. Neste artigo, pretende-se avaliar a viabilidade de produzir argamassas auto-compactáveis (AAC) com recurso a óxido de grafeno (OG). Será avaliado o desempenho de diversas argamassas em que a pasta ligante tradicional, composta com cimento Portland (C) e cinzas volantes das centrais termoeléctricas (CV), será reforçada pelo OG e estabelecidas as relações constitutivas que permitam a futura utilização deste tipo de material sem reservas quanto ao desempenho esperado. Actualmente, a reparação e reabilitação de estruturas de betão tem um papel de destaque na indústria da construção e as AAC desempenham um papel vital nesses trabalhos. O cimento, assim como os demais constituintes destas AAC, devem ser cuidadosamente seleccionados, a fim de se obter uma composição adequada com uma mistura granular tão compacta quanto possível e com bom desempenho tanto no estado fresco, como no estado endurecido. O OG é muito reactivo, devido essencialmente à sua elevada superfície específica e apresenta elevado potencial na melhoria das propriedades dessas AAC, principalmente ao nível do seu comportamento mecânico. Desse modo, o presente trabalho tem como principal objectivo avaliar o desempenho das AAC, tanto no estado fresco (auto-compactabilidade) como no estado endurecido (comportamento mecânico e durabilidade), em misturas binárias e ternárias de C, CV e OG. Foram realizadas 6 misturas, nomeadamente: [100%C]; [100%C+0.02%OG]; [100%C+0.06%OG]; [70%C+30%CV]; [70%C+30%CV+0.02%OG]; [70%C+30%CV+0.06%OG]. Os resultados obtidos permitiram verificar que a utilização de OG contribuiu para o decréscimo das propriedades das AAC no estado fresco. No entanto, os resultados obtidos demonstram indicadores promissores no que respeita ao comportamento mecânico das misturas estudadas.

Introdução

Para aumentar a fluidez e a estabilidade das argamassas auto-compactáveis (AAC) é necessário um maior teor de finos incluindo necessariamente o cimento. Para esse efeito, são utilizados habitualmente diversos materiais tais como fílires inertes ou adições pozolânicas. Existe, no entanto, o interesse de, mantendo propriedades de elevado desempenho destas argamassas, diminuir o consumo de cimento ou pelo menos não o aumentar utilizando para esse efeito nanomateriais como por exemplo o óxido de grafeno (OG).

Existe, portanto, um interesse significativo em verificar a viabilidade e validar a produção de AAC com a introdução do referido nanomaterial, de modo a oferecer à indústria um produto de elevado desempenho que dê resposta às actuais exigências dos materiais de reabilitação e que, em simultâneo, possibilite diminuir o consumo de cimento.

A utilização de OG na produção de argamassas e / ou betões apresenta-se como uma potencial mais-valia em termos da sua interacção com a matriz cimentícia necessitando, no entanto, de mais investigação [1]. As características únicas do OG, como por exemplo a sua superfície áspera, têm uma influência favorável sobre no comportamento mecânico da pasta de cimento. Com a utilização

de pequenas quantidades de OG, tão pouco quanto 0,05% (da massa de cimento) é possível aumentar a resistência à compressão em 15–33% e a resistência à flexão em 41–59%, respectivamente [2]. As propriedades superlativas do óxido de grafeno conferem-lhe um futuro promissor quando combinado com cimento, formando um nanocompósito [3-4]. O módulo de elasticidade do OG é estimado em aproximadamente 1 TPa [5]. Ele e Shi [6] referem que a incorporação de OG na mistura de cimento melhorou a resistência à penetração de cloretos e a resistência ao transporte de iões. É igualmente expectável que a adição de OG a argamassas de cimento aumente a sua resistência ao transporte de fluidos e ao ataque de químicos [7].

Relativamente à influência do OG nas propriedades no estado fresco de argamassas e pastas de cimento é de salientar o trabalho de Wang et al. [8], que verificaram que com o aumento da dosagem de OG a fluidez e o tempo de presa das pastas de cimento diminuíram, mas a viscosidade aumentou. Especialmente, quando a adição de OG é de até 0,03%, há uma mudança evidente na fluidez, viscosidade e tempo de presa. O referido comportamento demonstra que a adição de OG pode tornar as pastas de cimento mais espessas e pode acelerar o processo de hidratação do cimento. Segundo os autores [8], a diminuição da fluidez e o aumento da viscosidade podem ser atribuídos ao efeito da dimensão nanométrico e superfície específica do OG. A elevada superfície específica conjugada com grupos funcionais de OG contendo oxigénio podem contribuir para o aumento da sua interacção com o cimento hidratado.

Lv et al. [9] produziram diversas pastas de cimento com diferentes proporções de OG, C e superplastificante e verificaram que por cada aumento de 0,01% de OG foi necessário aumentar em 0,03% a quantidade de CP de modo a manter a fluidez relativamente à mistura de referência. Nesse sentido, os autores analisaram os efeitos da razão C/OG na fluidez e verificaram que há uma ligeira melhoria na fluidez quando comparada com a mistura de referência. Os autores referem igualmente que a utilização do superplastificante pode eliminar os efeitos negativos do OG na fluidez da pasta de cimento.

Lv et al. [3], avaliaram a resistência à compressão, à flexão e à tracção com a adição de OG em 0,01%, 0,02%, 0,03%, 0,04% e 0,05% em relação à massa de cimento e concluíram que a resistência à tracção e à flexão aumentaram com o aumento da dosagem de OG até 0,03%. À medida que aumentou a dosagem de OG acima dos 0,03%, os autores referem que as resistências à tracção e flexão diminuíram de modo gradual. As resistências à tracção e à flexão com 0,03% de OG (aos 28 dias de idade) aumentaram 78,6% e 60,7%, respectivamente, o que é notavelmente superior aos valores apresentados pela mistura de referência (sem OG). A resistência à compressão aumentou até aos 0,05% de OG, representando aos 28 dias um aumento de 47,9% relativamente à mistura sem OG.

Sun et al. (2020) [10] analisaram igualmente a resistência à flexão e à compressão de argamassas com diferentes proporções de OG, tendo, no entanto, obtido resultados significativamente inferiores aos reportados por Lv et al. [3]. Os autores referem aumentos de 6,25% relativamente à resistência à flexão e 13,23% para a resistência à compressão nas misturas optimizadas com OG em comparação à mistura de referência.

Para as propriedades de durabilidade verifica-se que existem menos trabalhos publicados e que a variabilidade dos resultados é superior ao observado para as propriedades mecânicas. É ainda de destacar o número limitado de estudos sobre o comportamento do OG em misturas binárias de cimento e cinzas volantes.

Nesse sentido, pretende-se avaliar a viabilidade de produzir AAC de elevado desempenho, através da adição de OG. Com estas AAC, pretende-se não só atingir um elevado desempenho relativamente ao comportamento mecânico e à durabilidade como também melhorar o desempenho ambiental da produção deste tipo de materiais de construção. Em resumo, a utilização de OG trará benefícios em termos do desempenho das AAC bem como em termos ambientais ao reduzir a extracção de matéria-prima para a produção de AAC bem como reduzir as emissões de CO₂ causadas pelo seu processo de produção.

Descrição da campanha experimental

Materiais utilizados. Foram utilizados os seguintes materiais:

- um tipo de cimento de acordo com a NP EN 197-1 (Cimento Portland tipo I-52,5 R, com massa volúmica de 3,20 kg/dm³) e uma adição, cinza volante (CV) de acordo com as NP EN 450-1 e NP EN 450-2, com massa volúmica de 2,30 kg/dm³; as granulometrias médias do C e da CV foram de 25 µm e 20 µm, respectivamente;
- duas areias siliciosas de acordo com a NP EN 12620, uma areia grossa (0/4) com massa volúmica de 2,55 kg/dm³, módulo de finura de 3,70 e absorção de água de 1,10% e uma areia fina (0/1) com massa volúmica de 2,58 kg/dm³, módulo de finura de 2,03 e absorção de água de 0,70%;
- um superplastificante (S_p) de elevado desempenho, forte redutor de água, de acordo com as NP EN 934-1 e NP EN 934-2 (uma combinação de policarboxilatos modificados, em solução aquosa com massa volúmica de 1,07 kg/dm³);
- água da rede pública de acordo com a NP EN 1008;
- óxido de grafeno fornecido pela Sigma-Aldrich, com uma dispersão em água de 4 mg/ml.

Materiais utilizados. As quantidades de amassadura apresentadas na Tabela 1 foram obtidas de acordo com o método proposto por Nepomuceno et al. [11-13]. Foram produzidas 6 misturas, 3 só com C e OG e 3 com C, CV e OG:

- C0 = 100% C
- C2 = 100% C + 0,02% OG
- C3 = 100% C + 0,06% OG
- CV0 = 70% C + 30% CV
- CV2 = 70% C + 30% CV + 0,02% OG
- CV6 = 70% C + 30% CV + 0,06% OG

O OG foi calculado em relação à massa de cimento e a água de diluição foi subtraída à água de amassadura.

Tabela 1: Quantidades de amassadura

Quantidades de amassadura [kg/m ³]	C0	C2	C6	CV0	CV2	CV6
Cimento	350	350	350	245	245	245
CV	---	---	---	53	53	53
S _p	5,9	6,4	6,4	5,4	5,9	5,9
Água	270	270	270	282	282	282
Areia Fina 0/1	761	761	761	759	758	758
Areia Grossa 0/4	758	758	758	756	755	755
OG [mg/m ³]	---	122,5	367,5	---	85,8	257,3
Água/Cimento	0,77	0,77	0,77	1,15	1,15	1,15
Água/Material Cimentício	0,77	0,77	0,77	0,95	0,95	0,95

Ensaio e preparação dos provetes. Ensaio de espalhamento no mini-cone: A determinação do diâmetro médio de espalhamento através do ensaio de espalhamento com recurso a um molde tronco cónico, permite a determinação do parâmetro G_m. neste ensaio, o valor obtido do diâmetro médio de espalhamento (D_m) é expresso através de uma área de espalhamento relativa (G_m) utilizando o método proposto por Okamura et al. [14].

$$G_m = \left(\frac{D_m}{D_0} \right)^2 - 1 \quad (1)$$

em que:

G_m = área de espalhamento relativa;

D_m = diâmetro médio de espalhamento, em mm;

D₀ = diâmetro inicial na base do cone, em mm.

Ensaio de escoamento no mini-funil-V: A determinação do tempo de escoamento através do ensaio de fluidez no mini-funil V, permite o cálculo do parâmetro R_m . Neste ensaio, o resultado obtido pode ser apresentado directamente pelo tempo de escoamento (t), medido em segundos. Pode, no entanto, determinar-se a velocidade relativa de escoamento R_m , utilizando tal como no ensaio de espalhamento o método desenvolvido por Okamura et al.[14]:

$$R_m = \frac{10}{t} \quad (2)$$

em que:

R_m = velocidade relativa de escoamento, em s^{-1} ;

t = tempo de escoamento, em segundos.

Ensaio de compressão e de flexão: Os ensaios de compressão e de flexão foram realizados de acordo com os procedimentos descritos na NP EN 1015-11, aos 7, 28 e 91 dias de idade, em 3 provetes prismáticos de 160 x 40 x 40 mm por cada mistura e idade. Os referidos provetes são inicialmente ensaiados à flexão, sobrando deste ensaio duas metades sensivelmente iguais que foram ensaiadas à compressão.

Ensaio de capilaridade: o ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado com base no procedimento descrito na EN 13057, aos 28 e 91 dias de idade, durante 72 horas de ensaio, em 3 provetes prismáticos de 160 x 40 x 40 mm. A absorção por capilaridade no tempo t_i é calculada dividindo o aumento da massa pela área da face do provete que esteve em contacto com a água. A absorção de água por capilaridade pode ser expressa em g/cm^2 para cada tempo t_i .

$$Abs_{capilar} = \frac{M_i - M_0}{A} \quad (3)$$

em que:

M_i = massa do provete no tempo t_i , em g;

M_0 = massa do provete no tempo t_0 , em g;

A = área da face do provete que esteve em contacto com a água, em cm^2 .

Apresentação e análise de resultados

Resultados no estado fresco. No que diz respeito aos resultados referentes ao estudo das AAC no estado fresco, é de salientar o facto de esses resultados constituírem, só por si, um objectivo a atingir. Por outras palavras, as amassaduras foram estudadas e realizadas, com as variações de composição ao nível da quantidade de água e de superplastificante, de modo a permitir o estudo das AAC em misturas com C, CV e OG, mas também a obter um material com um determinado comportamento no estado fresco, isto é, a auto-compactabilidade requerida às AAC.

Enquanto, numa argamassa convencional, é necessário a aplicação de uma energia adicional à fricção interna entre as partículas como modo de as “ajudar” a se distribuírem e preencherem correctamente os moldes, numa AAC tal não pode acontecer porque tem de ser a própria argamassa a conseguir tal efeito. Esse efeito reflecte-se evidentemente nos ensaios no estado fresco e consegue-se com recurso a um correcto dimensionamento das quantidades dos seus constituintes, de acordo com o proposto por Nepomuceno et al. [11-13].

O comportamento da AAC no estado fresco depende de inúmeros factores. Importa, no entanto, referir que a correlação entre os valores obtidos nos vários ensaios se reveste de alguma dificuldade porque os resultados desses ensaios eram já por si um objectivo a atingir. Ou seja, a análise dos resultados no estado fresco a seguir apresentada permite constatar que a totalidade das amassaduras executadas pode ser considerada auto-compactável e as variações observadas nas 2 famílias de argamassas (100%C e 70%C+30%CV) estão directamente relacionadas com a introdução do OG.

São apresentados, na Tabela 2 e na Figura 1 os resultados obtidos no estado fresco, nomeadamente, os parâmetros espalhamento no mini-cone (D_m), área de espalhamento relativa (G_m), tempo de escoamento no mini-funil (t) e velocidade relativa de escoamento (R_m).

Os resultados apresentados relativamente ao mini-cone permitem essencialmente avaliar o diâmetro de espalhamento das AAC. É possível observar que, os resultados obtidos por todas as misturas podem ser considerados satisfatórios, variando entre 210 e 275 mm. Em geral, é possível constatar uma boa distribuição do agregado (areia), sendo de notar a não ocorrência de exsudação nem de segregação. Pode-se ainda observar a presença de agregado mesmo no limite de espalhamento.

Tabela 2: Resultados no estado fresco

Mistura	Espalhamento no mini-cone			Escoamento no mini-funil		
	D_m [mm]	Δ_{Ref}	G_m	t [s]	Δ_{Ref}	R_m [s ⁻¹]
C0	259,35	---	5,73	9,78	---	1,02
C2	228,00	-12,09	4,20	9,20	-5,95	1,09
C6	210,90	-18,68	3,45	8,51	-13,01	1,18
CV0	273,60	---	6,49	11,04	---	0,91
CV2	257,50	-5,88	5,63	10,35	-6,25	0,97
CV6	233,70	-14,58	4,46	9,48	-14,13	1,05

A influencia do OG no espalhamento é notória e representa uma perda de trabalhabilidade entre 12% e 19 % nas misturas com 100%C e entre 5% e 15 % nas misturas com 70%C+30%CV. O comportamento observado pode ser atribuído à elevada superfície específica do OG que quando adicionado nas argamassas pode provocar a aglomeração das partículas de cimento e desse modo fomenta a formação de flóculos que naturalmente vão limitar a trabalhabilidade das misturas [8, 15].

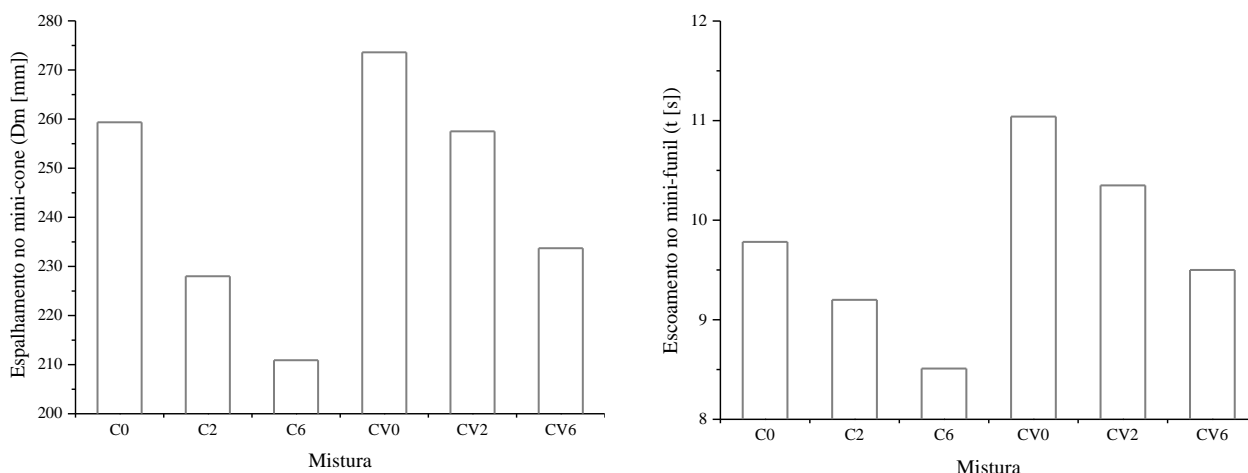


Figura 1: Espalhamento no mini-cone (esq), Escoamento no mini-funil (dtª)

Analisando os resultados obtidos verifica-se igualmente que a perda de trabalhabilidade é menor nas misturas com CV. Este facto pode ser devido a dois factores:

- Por um lado, as CV são partículas esféricas com menor necessidade de água, que funcionam como “esferas” entre as partículas de cimento, aumentando, desse modo, a fluidez da mistura;
- Por outro lado, devido à menor finura das partículas de CV (por comparação com as partículas de cimento), as mesmas preenchem os vazios entre as partículas de cimento e desse modo não só melhoram a distribuição granulométrica do material pulverulento como melhoram a fluidez da pasta de cimento [16, 17].

Os valores médios apresentados na tabela 2 e na figura 1, relativamente ao tempo de escoamento no mini funil V, permitem avaliar a capacidade das AAC de passar através de pequenas aberturas. Da observação dos resultados, é possível constatar que os valores médios obtidos por todas as misturas estudadas se enquadram como auto-compactáveis, variando, no geral, entre 8,5 e 11 segundos.

Da observação visual do ensaio, é possível verificar o não bloqueio na passagem estreita, a presença de agregado (areia) no topo do molde (antes da abertura da comporta) bem como a não

ocorrência de exsudação. Pode ainda observar-se que, após a realização do ensaio, a argamassa continua a apresentar-se como uma massa uniformemente distribuída.

Relativamente ao escoamento no mini-funil verificasse um comportamento análogo ao observado para o espalhamento com uma perda de fluidez entre 5% e 13% para as misturas com 100%C e entre 6% e 14% para as misturas com 70%C+30%CV. A perda de fluidez devida ao aumento da percentagem do OG nas misturas é equivalente ao observado no ensaio de espalhamento.

Pode concluir-se, da análise conjunta dos dois ensaios (mini-cone e mini-funil), que todas as misturas analisadas apresentam coesão, com um aspecto viscoso sem, no entanto, perderem a capacidade de se deformar.

Resultados no estado endurecido – comportamento mecânico. Os resultados da resistência à compressão e à flexão são apresentados na Tabela 3, Figuras 2 e 3, Tabela 4 e Figuras 4 e 5 respectivamente. Os resultados mostram um aumento considerável nas resistências à compressão e à flexão. A adição de OG aumenta, aos 28 dias, a resistência à compressão de 20 a 24% e resistência à flexão de 3 a 10% nas misturas com 100%C. Nas misturas com 70%C+30%CV o referido aumento é de 16 a 21% na resistência à compressão e de 13 a 20% na resistência à flexão.

Tabela 3: Resultados no estado endurecido – compressão

Mistura	Resistência à compressão [MPa]								
	$f_{cm,7d}$	S	Δ_{Ref} [%]	$f_{cm,28d}$	S	Δ_{Ref} [%]	$f_{cm,91d}$	S	Δ_{Ref} [%]
C0	14,93	1,61	---	21,88	2,65	---	22,57	2,52	---
C2	18,95	2,82	26,94	26,35	4,26	20,44	28,12	3,45	24,58
C6	20,21	0,21	35,43	27,10	0,38	23,86	28,32	0,36	25,46
CV0	10,77	0,06	---	12,32	0,08	---	13,70	0,08	---
CV2	12,33	0,73	14,49	14,33	1,07	16,33	15,59	0,92	13,80
CV6	12,92	0,37	20,00	14,87	0,48	20,66	16,00	0,44	16,78

O referido aumento da resistência das argamassas com a adição do OG pode ser atribuído à forte interligação entre o OG e a matriz cimentícia [18]. De acordo com Li e Cols [19] O OG contém grupos de ácido carboxílico que conseguem reagir com o CSH e com $Ca(OH)_2$ o que contribui para a criação de uma forte ligação covalente entre o OG e a matriz cimentícia e, desse modo, melhorar as propriedades mecânicas da mistura. Yang et al [20] apresentam conclusões semelhantes referindo que a adição de OG distribui a tensão imposta pelas cargas externas e reduz a pressão sobre o CSH devido essencialmente à melhor interligação do OG com a matriz cimentícia.

Por outro lado, Lin et al [21], referem que o aumento da resistência devido à adição de OG depende essencialmente do seu contributo para o processo de hidratação do cimento actuando/funcionando como um catalisador. A elevada superfície específica e capacidade de adsorção de água do OG geram “reservatórios de água” e “canais de transporte” para a fase fluida da mistura (incluindo para as partículas de cimento) promovendo igualmente pontos de nucleação e fomentando o crescimento de cristais de cálcio. No mesmo sentido, Li et al [22], com recurso ao estudo da evolução do calor de hidratação de misturas com OG nas primeiras idades referem que o efeito de nucleação mencionado por Lin et al [21] encurtou a fase de dormência da hidratação do cimento de tal modo que a taxa de hidratação e o calor cumulativo de hidratação da pasta de cimento com OG foram significativamente maiores do que os da pasta de cimento sem OG. Os mesmos autores [22] concluem que o efeito do OG na hidratação do C_3A é significativamente maior do que no C_3S , o que conduz a uma microestrutura mais densa com mais produtos de hidratação envolvendo os poros de OG e conseqüente melhoria de resistência mecânica das misturas.

No caso da resistência à compressão verificam-se valores mais significativo nas misturas com 100%C do que nas misturas com 70%C+30%CV, associado por um lado às diferenças na razão A/C entre as duas famílias de AAC e por outro ao efeito das CV no processo de endurecimento e evolução da resistência. Tal como verificado por Wang et al [17], apesar da diminuição geral da resistência com a adição das CV (por comparação com as misturas 100%C) é possível verificar que a resistência das misturas com CV e OG (CV2 e CV6) é sempre superior à mistura de referência (CV0). Os autores [17] salientam ainda que apesar das desvantagens associadas ao atraso inicial no

desenvolvimento da resistência devido às CV, estas podem compensar a perda de fluidez devida ao OG (ver Figura 1 e 2).

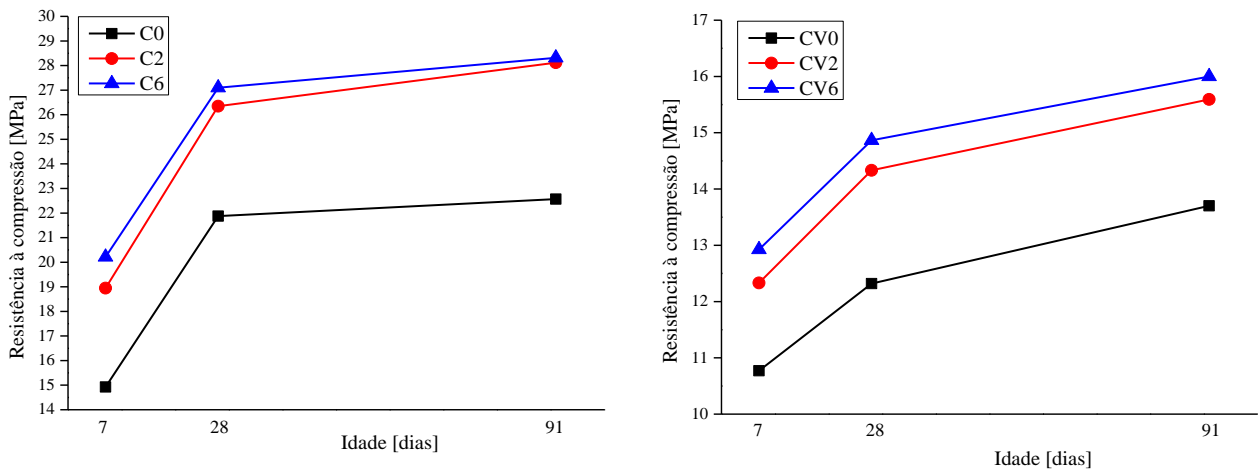


Figura 2: Variação da resistência à compressão com a idade, misturas 100% C (esq) e misturas 70% C + 30% CV (dta)

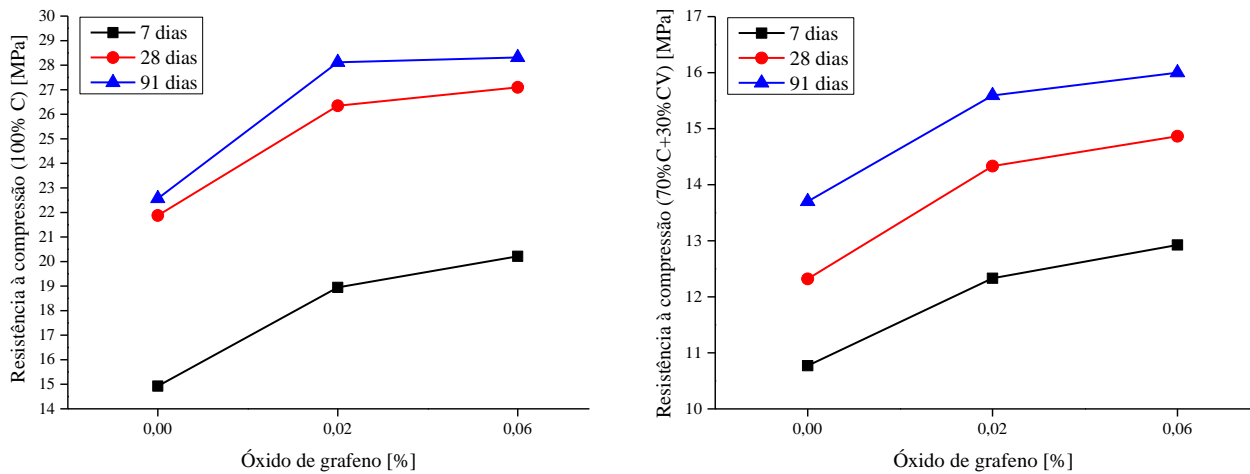


Figura 3: Variação da resistência à compressão com a percentagem de óxido de grafeno, misturas 100% C (esq) e misturas 70% C + 30% CV (dta)

Analisando a Figura 3 verificasse que as diferenças na resistência à compressão entre as misturas com 0,02% e 0,06% são reduzidas, apresentando variações inferiores a 3% aos 28 dias e a 1% aos 91 dias nas misturas 100% C e inferiores a 4% aos 28 dias e a 3% aos 91 dias nas misturas 70% C + 30% CV. Diversos autores [23-29] referem que a quantidade de OG que otimiza a resistência à compressão deverá estar entre $\approx 0,03\%$ e $\approx 0,07\%$, podendo variar em função da composição do OG. É possível observar, em alguns dos referidos trabalhos, que a partir de $\approx 0,09\%$ (dependendo do tipo de OG) é possível, inclusive, obter uma redução geral do comportamento mecânico.

Tabela 4: Resultados no estado endurecido – flexão

Mistura	Resistência à flexão [MPa]								
	$f_{ctm,7d}$	S	Δ_{Ref^a} [%]	$f_{ctm,28d}$	S	Δ_{Ref^a} [%]	$f_{ctm,91d}$	S	Δ_{Ref^a} [%]
C0	3,44	0,02	---	4,60	0,02	---	4,90	0,02	---
C2	3,72	0,17	8,08	4,75	0,20	3,28	5,15	0,17	5,09
C6	3,96	0,17	15,09	5,08	0,24	10,37	5,38	0,23	9,90
CV0	2,68	0,14	---	3,01	0,18	---	3,37	0,18	---
CV2	2,98	0,11	11,17	3,41	0,12	13,33	3,81	0,11	13,11
CV6	3,16	0,34	18,06	3,61	0,35	19,91	3,94	0,32	17,03

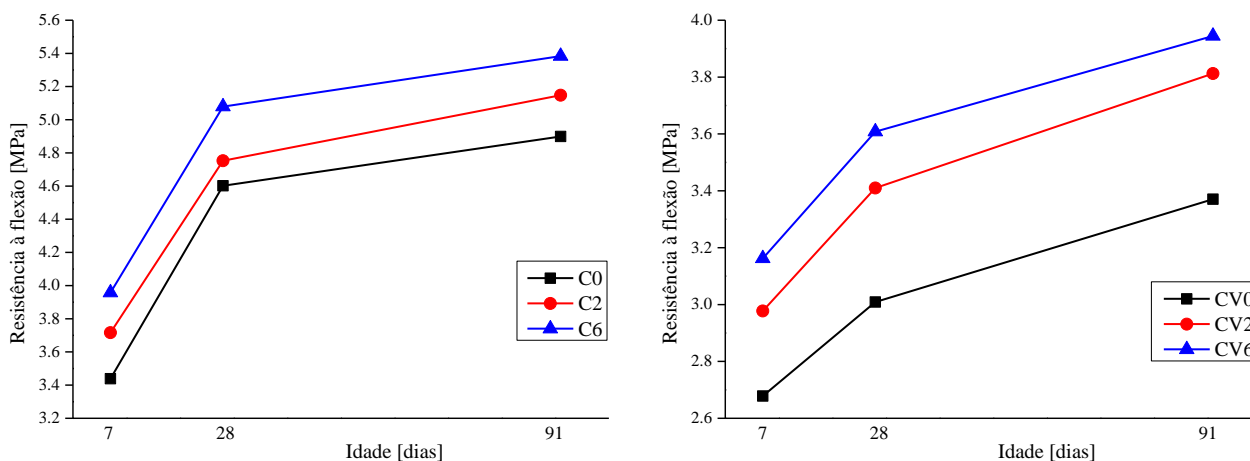


Figura 4: Variação da resistência à flexão com a idade, misturas 100% C (esq) e misturas 70% C + 30% CV (dta)

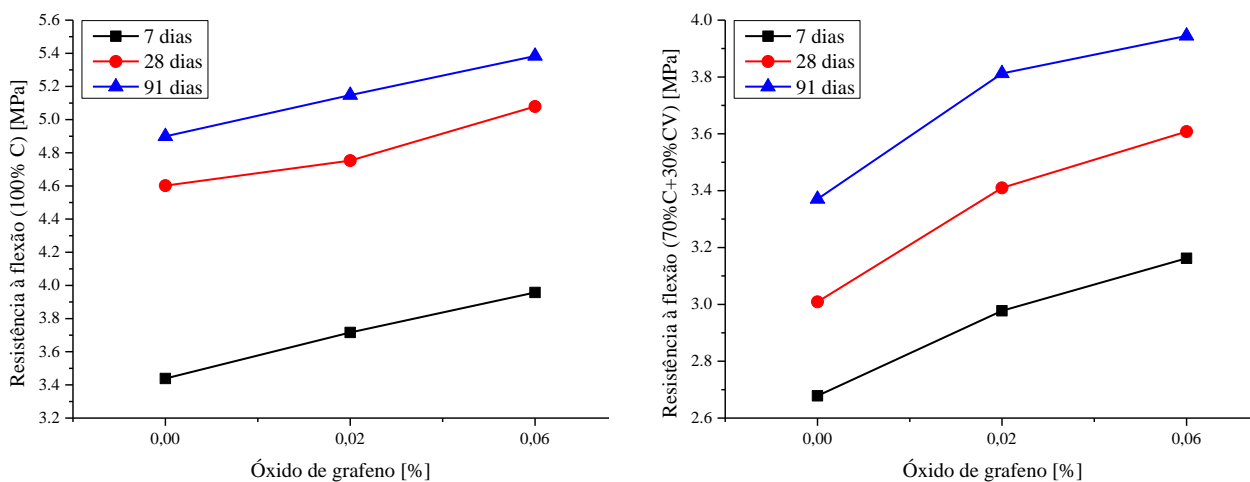


Figura 5: Variação da resistência à flexão com a percentagem de óxido de grafeno, misturas 100% C (esq) e misturas 70% C + 30% CV (dta)

Resultados no estado endurecido – absorção de água por capilaridade. Na Tabela 5 e nas Figuras 6 e 7 são apresentados os valores de absorção de água por capilaridade e o respectivo coeficiente de absorção para os 28 e os 91 dias de idade. Relativamente a este mecanismo de transporte verifica-se um comportamento significativamente díspar do observado na resistência mecânica. Nas misturas com C é possível observar que a C2 (com 0,02% de OG) apresenta um desempenho mais favorável que as restantes, enquanto a C6 (com 0,06% de OG) obteve valores de absorção superiores aos da mistura de referência. Esta tendência manteve-se nas duas idades estudadas (28 e 91 dias).

Nas misturas com 70% C + 30% CV verificasse um comportamento diferente: a adição de OG não representou qualquer ganho na absorção de água por capilaridade nas duas idades estudadas (28 e 91 dias). Nestas misturas, com o acréscimo de OG, verificasse um aumento tanto da absorção como do respectivo coeficiente. No entanto, como seria expectável, o desempenho global das misturas melhora com a idade (dos 28 para os 91 dias).

Os referidos resultados estão em linha com o observado por outros autores. Mohammed et al [7] referem que a adição de OG aumenta a quantidade de pequenos poros presentes na matriz cimentícia, aumentando significativamente a quantidade de poros com dimensão inferior a 15 nm. Outros autores [30, 31, 32] referem que a adição de OG pode conduzir a um aumento na parcela de poros capilares na faixa de 100 a 1000 nm. As variações nos valores apresentados estão claramente associadas às diferenças no tipo de OG bem como às diferentes dosagens estudadas pelos referidos autores. Bykham [30] e Lv S et al [31] afirmam que o referido comportamento pode ser atribuído ao facto de algumas camadas de OG possuírem folhas tridimensionais interligadas formando uma estrutura porosa semelhante a um material “esponjoso”.

Tabela 5: Resultados no estado endurecido - capilaridade

Identificação		Abs t 1/4 horas	Abs t 1/2 horas	Abs t 3/4 horas	Abs t 1 horas	Abs t 2 horas	Abs t 4 horas	Abs t 6 horas	Abs t 24 horas	Abs t 72 horas	Coef de absorção										
Mistura	Idade [dias]	Abs _m	S	Abs _m	S	Abs _m	S	Abs _m	S	Abs _m	S	Coef _{abs}	R ²								
		[Kg/m ²]		[Kg/m ²]		[Kg/m ²]		[Kg/m ²]		[Kg/m ²]		[mm/min ^{0,5}]									
C0	28	0,619	0,169	0,947	0,272	1,241	0,378	1,375	0,412	1,947	0,572	2,741	0,803	3,331	0,969	6,200	1,438	9,897	2,103	0,177	0,999
	91	0,340	0,022	0,526	0,047	0,713	0,021	0,814	0,129	1,177	0,346	1,802	0,232	2,193	0,374	4,693	0,326	8,793	0,374	0,119	0,996
C2	28	0,434	0,009	0,503	0,072	0,644	0,112	0,712	0,106	0,975	0,181	1,384	0,303	1,703	0,397	3,584	0,909	5,319	0,744	0,088	0,997
	91	0,238	0,012	0,280	0,013	0,369	0,063	0,420	0,033	0,591	0,110	0,912	0,088	1,119	0,235	2,725	0,207	4,714	0,318	0,059	0,995
C6	28	0,634	0,047	0,991	0,053	1,288	0,069	1,572	0,084	2,419	0,119	3,728	0,141	4,731	0,181	9,772	0,184	15,453	0,091	0,258	0,989
	91	0,348	0,060	0,551	0,093	0,740	0,039	0,930	0,026	1,463	0,072	2,453	0,041	3,113	0,107	7,881	0,045	12,598	0,148	0,172	0,976
CV0	28	0,403	0,028	0,516	0,009	0,603	0,009	0,691	0,022	0,966	0,078	1,394	0,131	1,734	0,172	4,053	0,347	8,553	1,134	0,090	0,998
	91	0,219	0,036	0,283	0,016	0,339	0,005	0,399	0,007	0,568	0,046	0,878	0,036	1,071	0,096	2,895	0,074	7,592	2,014	0,057	0,995
CV2	28	0,434	0,047	0,647	0,103	0,812	0,131	0,928	0,153	1,469	0,213	2,322	0,297	3,050	0,356	7,541	0,647	15,394	1,431	0,163	0,983
	91	0,237	0,060	0,354	0,018	0,458	0,072	0,537	0,047	0,863	0,125	1,374	0,077	2,012	0,211	5,370	0,138	13,688	2,545	0,105	0,961
CV6	28	0,487	0,019	0,750	0,013	0,975	0,006	1,156	0,019	1,822	0,116	2,859	0,284	3,722	0,434	9,059	1,078	17,553	1,353	0,201	0,984
	91	0,266	0,024	0,412	0,022	0,547	0,003	0,668	0,006	1,132	0,072	1,689	0,074	2,299	0,241	6,439	0,230	15,710	2,422	0,124	0,977

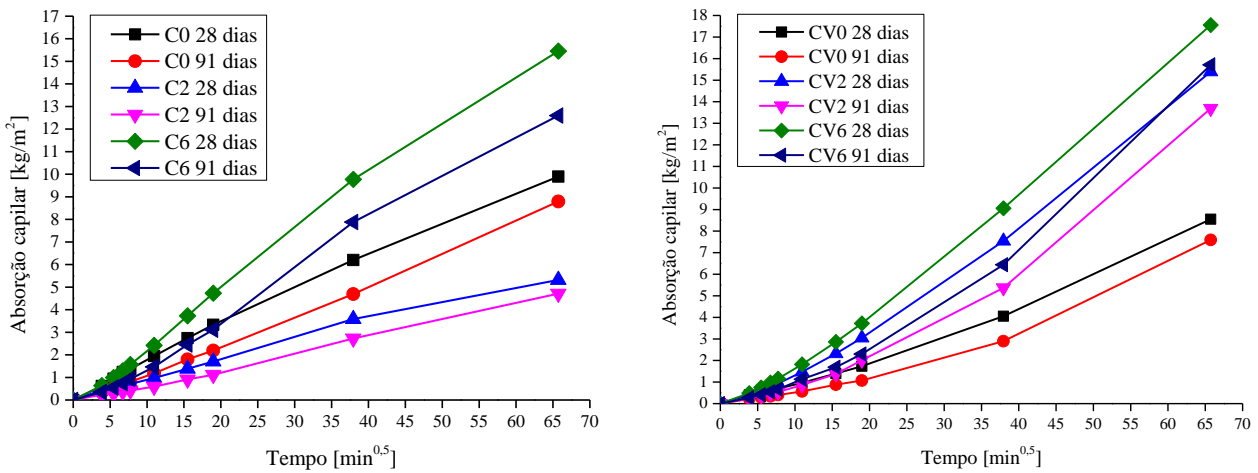


Figura 6: Curvas de absorção capilar aos 28 e 91 dias para as misturas 100% C (esq) e 70% C + 30% CV (dta)

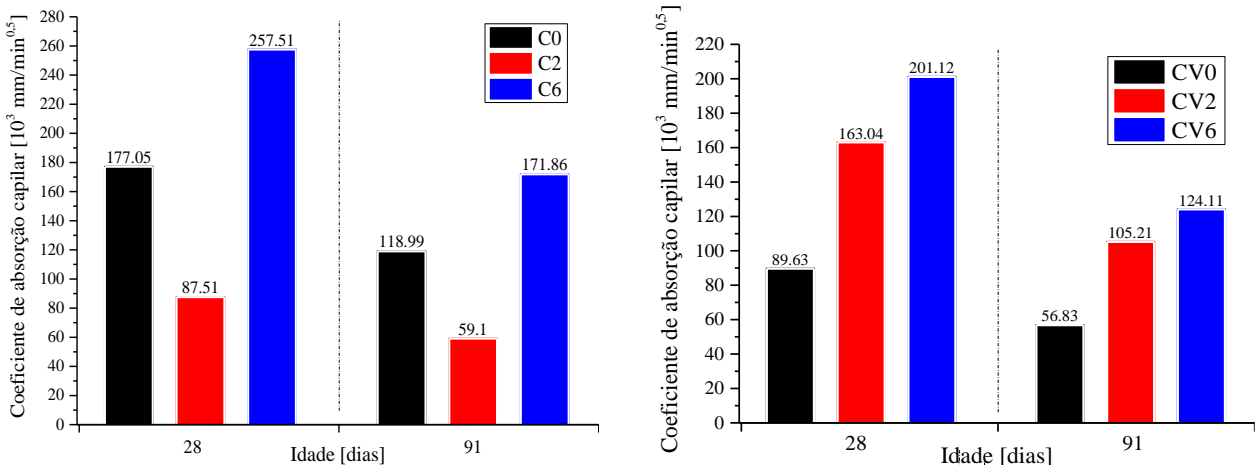


Figura 7: Coeficientes de absorção capilar aos 28 e 91 dias para as misturas 100% C (esq) e 70% C + 30% CV (dta)

Conclusões

Todas as misturas estudadas, só com C, com CV em substituição parcial do cimento e com a adição de OG, cumprem os requisitos no que diz respeito à viscosidade, capacidade de escoamento e capacidade de passagem em espaços confinados e, portanto, podem ser classificadas como auto-compactáveis. Ou seja, a incorporação do OG permitiu a produção de ACC com um desempenho adequado no estado fresco, apesar de, no entanto, ter ocorrido alguma perda de trabalhabilidade compensada com o ajuste nas dosagens de superplastificante. A referida perda de desempenho ocorreu essencialmente devido à elevada superfície específica das partículas de OG que

tendencialmente dificultam a dispersão das partículas de cimento, limitando desse modo o escoamento.

A adição de OG melhorou significativamente o desempenho mecânico de todas as misturas estudadas. Considerando os 28 dias de idade de ensaio é de salientar um aumento de 35% na resistência à compressão da mistura com C e 0,06% de OG por comparação com a mistura de referência. O referido aumento generalizado do comportamento mecânico de todas as misturas estudadas está fortemente relacionado com a melhoria da interligação entre o OG e a matriz cimentícia bem como com o seu contributo para o processo de hidratação do cimento funcionando como um catalisador na reacção.

No geral verifica-se que a melhoria do desempenho mecânico das misturas com a adição de OG está fortemente relacionado com a melhoria da microestrutura devido ao efeito regulador de OG, acelerando o processo de hidratação, regulando os cristais de hidratação, otimizando a estrutura dos poros e melhorando a interface de ligação da matriz cimentícia.

No caso da absorção de água por capilaridade observasse um comportamento distinto do comportamento mecânico. Nas misturas com 100% de C obteve-se uma melhoria com 0,02% de OG que se anula com 0,06%. Nas misturas binárias observa-se uma perda global de desempenho com a adição do OG. As propriedades do OG apresentam uma influência significativa no desempenho das misturas, no entanto, existem diversos estudos que apontam para um aumento da parcela de poros capilares com a adição de OG.

Com o presente trabalho foi possível verificar, no geral, uma melhoria no desempenho das argamassas produzidas com OG, demonstrando a viabilidade desta adição, por exemplo, na contribuição para a redução da quantidade de cimento nas misturas não só de argamassas como até de betões. Será, no entanto, essencial realizar mais estudos que permitam verificar a influencia da adição do OG na durabilidade das misturas.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Instituto Politécnico de Lisboa (IPL) através do financiamento do projecto de investigação científica “LOWCO₂MPOSITES - Durable environmental-friendly cement composites using very low binder contents (IPL/2022/ LOWCO₂MP_ISEL)”. Agradece-se de igual modo o apoio do centro de investigação CERIS - IST.

Referências

- [1] Chuah S., Pan Z., Sanjayan J., Wang C., Duan W., *Nano reinforced cement and concrete composites and new perspective from graphene oxide (Review)*, Construction and Building Materials, Elsevier Science LTD, Vol. 73, pp. 113-124 (2014).
- [2] Hou P. et al., *Modification effects of colloidal nanoSiO₂ on cement hydration and its gel property*, Compos Part B: Eng, 45(1), 440–8 (2013).
- [3] Lv S, Ma Y, Qiu Ch, Liu J, Sun T, Zhou Q., *Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites*, Construction and Building Materials, 49, 121–7, (2013).
- [4] Pan Z, Duan W, Li D, Collins F., *Graphene oxide reinforced cement and concrete*, Monash University, [WO2013096990 A1] (2013).
- [5] Kuilla T, Bhadra S, Yao D, Kim NH, Bose S, Lee JH., *Recent advances in grapheme based polymer composites*, Prog Polym Sci, 35(11), 1350–75 (2010).
- [6] He X, Shi X., *Chloride permeability and microstructure of Portland cement mortars incorporating nanomaterials*, Transp Res Rec, 2070(1), 13–21 (2008).

- [7] Mohammed A., Sanjayan J.G., Duan W.H., Nazari A., *Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites*, Construction and Building Materials, 84:341-347 (2015).
- [8] Wang, Q., Wang, J., Lu, C. X., Liu, B. W., Zhang, K., & Li, C. Z., *Influence of graphene oxide additions on the microstructure and mechanical strength of cement*. Xinxing Tan Cailiao/New Carbon Materials, 30(4), 349–356 (2015).
- [9] Lv, S. H., Deng, L. J., Yang, W. Q., Zhou, Q. F., & Cui, Y. Y., *Fabrication of polycarboxylate/graphene oxide nanosheet composites by copolymerization for reinforcing and toughening cement composites*, Cement and Concrete Composites, 66, 1–9 (2016).
- [10] Sun, H., Ling, L., Ren, Z., Memon, S. A., & Xing, F. (2020). *Effect of graphene oxide/graphene hybrid on mechanical properties of cement mortar and mechanism investigation*, Nanomaterials, 10(1) (2020).
- [11] Nepomuceno, M. and Oliveira, L., *Parameters for self-compacting concrete mortar phase*. ACI Materials Journal, 253: 323–340 (2008).
- [12] Nepomuceno, M.; Oliveira, L.; Lopes, S.M.R., *Methodology for mix design of the mortar phase of self-compacting concrete using different mineral additions in binary blends of powders*, Constr. Build. Mater. 26, 317–326 (2012).
- [13] Silva, P., de Brito, J. and Costa, J., *Viability of two new mix design methodologies for SCC*, ACI Mater J, 108(6):579–588 (2011).
- [14] Okamura h., Ozawa K, Ouchi M., *Self-Compacting Concrete*, Structural Concrete Journal, Thomas Telford Ltd, vol. 1, No. 1, pp. 3-17 (2000).
- [15] S.H. Lv, Y.J. Ma, C.C. Qiu, et al., *Effect of graphene oxide nanosheets of microstructure and mechanical properties of cement composites*, Constr. Build. Mater. 49, 121–127 (2013).
- [16] Y.R. Zhang, X.M. Kong, Z.C. Lu, et al., *Influence of triethanolamine on the hydration product of portlandite in cement paste and the mechanism*, Cem. Concr. Res. 87, 64–76 (2016).
- [17] Q. Wang, X. Cui, J. Wang, S. Li, C. Lv, Y. Dong, *Effect of fly ash on rheological properties of graphene oxide cement paste*, Constr. Build. Mater. 138, 35–44 (2017).
- [18] Z. Pan, L. He, L. Qiu, A. H. Korayem, G. Li, J. W. Zhu, F. Collins, D. Li, W. H. Duan, M. C. Wang, *Mechanical properties and microstructure of a graphene oxide–cement composite*, Cement & Concrete Composites 58, 140–147(2015).
- [19] Li GY, Wang PM, Zhao X., *Mechanical behavior and microstructure of cement composites incorporating surface-treated multi-walled carbon nanotubes*, Carbon;43(6):1239–45 (2005).
- [20] H. Yang, M. Monasterio, H. Cui, N. Han; *Experimental study of the effects of graphene oxide on microstructure and properties of cement paste composite*, Composites: Part A 102 263–272 (2017).
- [21] C. Lin, W. Wei, Y.H. Hu, *Catalytic behavior of graphene oxide for cement hydration process*, J. Phys. Chem. Solid. 89, 128–133 (2016).
- [22] W. Li, X. Li, S.J. Chen, Y.M. Liu, W.H. Duan, S.P. Shah, *Effects of graphene oxide on early-age hydration and electrical resistivity of Portland cement paste*, Construct. Build. Mater. 136 506–514 (2017).
- [23] R. Kaur, N.C. Kothiyal, H. Arora, *Studies on combined effect of superplasticizer modified graphene oxide and carbon nanotubes on the physico-mechanical strength and electrical resistivity of fly ash blended cement mortar*, J. Build. Eng. 30, 101304(2020).

- [24] Z. Lu, D. Hou, L. Meng, G. Sun, C. Lu, Z. Li, *Mechanism of cement paste reinforced by graphene oxide/carbon nanotubes composites with enhanced mechanical properties*, RSC Adv. 5 (122) 100598–100605 (2015).
- [25] C. Zhou, F. Li, J. Hu, M. Ren, J. Wei, Q. Yu, *Enhanced mechanical properties of cement paste by hybrid graphene oxide/carbon nanotubes*, Construct. Build. Mater. 134 336–345 (2017).
- [26] S. Najafshad, H.D. Manesh, S.M. Zebarjad, N. Hataf, Y. Mazaheri, *Production and investigation of mechanical properties and electrical resistivity of cement-matrix nanocomposites with graphene oxide and carbon nanotube reinforcements*, Arch. Civ. Mech. Eng. 20 (2) 57(2020).
- [27] H. Sun, L. Ling, Z. Ren, S.A. Memon, F. Xing, *Effect of graphene Oxide/Graphene hybrid on mechanical properties of cement mortar and mechanism investigation*, Nanomaterials 10 (1) 113 (2020).
- [28] H. Liu, Y. Yu, H. Liu, J. Jin, S. Liu, *Hybrid effects of nano-silica and graphene oxide on mechanical properties and hydration products of oil well cement*, Construct. Build. Mater. 191, 311–319 (2018).
- [29] C. Lin, W. Wei, Y.H. Hu, *Catalytic behavior of graphene oxide for cement hydration process*, J. Phys. Chem. Solid. 89, 128–133 (2016).
- [30] Bykkam S, Rao V, Ch SC, Thunugunta T. *Synthesis and characterization of graphene oxide and its antimicrobial activity against Klebsella and Staphylococcus*, Int J Adv Biotechnol Res; 4:142–6 (2013).
- [31] Lv S, Ma Y, Qiu C, Zhou Q. *Regulation of go on cement hydration crystals and its toughening effect*, Mag Concr Res, 65:1246–54 (2013).
- [32] Panzavolta S, Bracci B, Gualandi C, Focarete ML, Treossi E, Kouroupis-Agalou K, et al. *Structural reinforcement and failure analysis in composite nanofibers of graphene oxide and gelatin*, Carbon,78:566–77 (2014).

Physico-chemical characterization of olive oil production residues: valorization as building materials

JERÓNIMO Alexandre^{1a}, BRIGA-SÁ Ana^{1,2b}, BERMUDEZ Verónica de
Zea^{1,3c}, NUNES Silvia C.^{4d} and FERNANDES Mariana^{1,3e}

¹ CQ-VR, University of Trás-os-Montes e Alto Douro, 5000-801 Vila Real, Portugal.

² ECT- School of Science and Technology, University of Trás-os-Montes e Alto Douro, 5000-801 Vila Real, Portugal.

³ Departement of Chemistry, University of Trás-os-Montes e Alto Douro, 5000-801 Vila Real, Portugal.

⁴ FibEnTech - Fiber Materials and Environmental Technologies, University of Beira Interior, 6201-001 Covilhã, Portugal

^a ajaj@utad.pt, ^banas@utad.pt, ^cvbermude@utad.pt, ^dsilvia.nunes@ubi.pt, ^e mspf@utad.pt

Palavras-chave: Waste valorization, Bio-wastes, Sustainable materials, Circular economy

Abstract. The high amount of waste generated in the various economic activities is a major concern of the current European policy, whose priority objectives are: to reduce the amount of waste produced; to maximize recycling and reuse; to limit incineration to non-recyclable materials; and to limit landfill to non-recyclable and non-recoverable waste. The construction sector plays an important role in this context, contributing in a very significant way to waste production and raw materials consumption. In order to meet the European targets in this matter, it is necessary to adopt cost effective, environmental and appropriate construction solutions, and also to upgrade traditional techniques with locally available materials. The possibility of incorporating different types of bio-wastes as construction materials is nowadays a challenge. According to the literature, a significant amount of work can be done in this field, depending on the variety of wastes available and the required application for building purposes. It is also known that physical-chemical properties of these innovative materials can lead to a wide variation in their performance, meaning that further studies should be conducted. This preliminary study aims at contributing to the physical and chemical characterization of the residues resulting from the olive oil production for further application as building material components. The results obtained revealed that the various olive bio-wastes analysed are quite similar, with a homogeneous appearance, composed mostly of carbon and oxygen, with bulk densities in the 1134-1275 kg/m³ range, a super-hydrophilic nature, and acidic character.

Introduction

The United Nations (UN) predicts that by 2050 the world population will reach 9,7 billion people [1]. Considering this development, the human well-being, the environmental sustainability, and the growing economy are fundamental concerns. Due to this increase in Population the amount of waste generated is a direct consequence. According to Eurostat [2], in 2020 about 2 151 million tons or 4 808 kg per capita of waste were produced in all economic activities and households, ca. 1% corresponding to agriculture, forestry, and fishing, and ca. 37.1% corresponding to the construction sector.

An ideal economic model incorporates the circular economy, with the goal of reducing the consumption of resources and the creation of waste, through the management, reuse and recycling of wastes generated during the production, distribution, and consumption processes. This will be traduced into a direct impact on health and environment. Reducing the amount of waste produced, maximizing recycling and reuse, and limiting incineration to non-recyclable and non-

recoverable materials, are three important issues that mankind will have to face in the coming years.

The construction industry plays an important role in this context as it contributes decisively to the production of waste and consumption of raw materials. At the same time, it can also play an important role in the valorisation of different wastes and by-products as building material components.

Several studies have been developed in order to study the potential use of agro-wastes as brick/masonry elements, concrete replacement, insulation materials, reinforcement materials, particleboards, and bio-based plastics [3, 4]. The use of agricultural wastes, such as sugarcane bagasse, paddy and wheat straw and husk, wastes of vegetables, food products, tea, oil production, jute fiber, groundnut shell, wooden mill waste, coconut, husk, cotton stalk, as sustainable construction materials, were investigated as a possibility [3]. A great emphasis was given on their application as ash and less work was done on the application of these materials without undergoing any transformation process. Pozzolanic properties of rice husk, banana leaves ashes, bamboo leaf, bagasse ash, and palm oil lend themselves to use in ordinary concrete as cement replacement [3-4-9]. In addition to the lightweight properties that these wastes can bring to building elements [10], thermal and acoustic properties can also be achieved [11-13]. Vegetable fibers, such as sisal and bamboo, can also be used, either alone or as reinforcement in different types of matrices, such as soil and cement composites [14-16]. Reed fiber can be incorporated into a concrete composite, producing a significant decrease in buildings heat loss due to the lower thermal conductivity [17]. The use of agricultural waste as aggregate in concrete mixtures is also a possibility [18]. Regarding the utilization of olive production waste, the few studies found in the literature referred to its incorporation in the production of blocks [19-21].

The olive cultivation and olive oil production are two of the most important agricultural activities in the Mediterranean basin. The olives and olive oil are the basis of healthy foods (Mediterranean diet), being this economic sector responsible for the generation of employment and for the brake of rural depopulation [22]. However, the olive oil production is also known for the formation of large amounts of waste that can affect the environment, such for instance the wet bagasse. The management of olive processing waste has received considerable attention in the last decades.

In Portugal 135.0238 tons of olives were produced in 2021, of which 113.727 tons were produced only in the Trás-os-Montes and Alto Douro region [23]. This scenario corresponds to a production of 108.0000 tons and 91.000 tons of wet bagasse in Portugal and Trás-os-Montes and Alto Douro, respectively [23]. From the extraction process of the wet bagasse, stones, dry bagasse, fats, and wastewater result. Normally, the stones are used as biomass, which results in ash. The dried bagasse is used as fertilizer and the wastewater must be treated [24].

The main goal of the present work was to characterize the bio-wastes resulting from the olive oil extraction to assess the possibility of incorporating them into construction materials, such as mortars, concrete, blocks, covering panels, among others. A complete analysis of the residues resulting from the production chain of olive oil extraction will make it possible to solve eventual blockages to the production, in the years of greater production, when the mills have difficulty in discarding the residues [25]. If we can find alternatives to the simple treatment of waste or its current uses, mainly as biofuels, we can boost the circular economy (using waste as a raw material for civil construction) and help prevent the collapse of production chains in exceptional years of production.

A detailed analysis of the residues, considering their physical, chemical, and microscopic properties, is mandatory before attempting to apply them. This analysis will make it possible to anticipate possible incompatibilities between the materials and eliminate some steps in the experimental process.

Experimental Part

Materials and Methods. Several olive tree species (Figure 1 a) occur in the Northeast region of the region of Trás-os-Montes and Alto Douro, the most popular for the production of the olive oil being Cobrançosa, Verdeal Transmontana, Madural, Galega, and Negrinha. The olives (Figure 1b) were not selected. The bio-wastes under study were collected between December 20 and 27, 2021 at the agricultural cooperative Sabodouro CRL, Mogadouro, Portugal (Figure 1c), which employs a 2-phase extraction.

The bio-wastes selected for this work were olive bagasse, stones, and stones ash resulting from the production of olive oil. After the extraction of the oil, the wet bagasse that remains (olive bio-waste 1 – OBW1, Figure 1d) undergoes a centrifugation process leading to wet bagasse without olive stones (olive bio-waste 2 - OBW2, Figure 1 e) and olive stones (olive bio-waste 3 - OBW3, Figure 1f). The olive stones are then reintroduced in the production cycle as heat source for the water washing step, which leads to the olive stone ash (olive bio-waste 4 - OBW4, Figure 1g).

OBW1 and OBW2 are brown pastes with an intense odour, which contain olive stones in different percentages (more significant in the case of OBW1 and residual in the case of OBW2). OBW3 is a homogeneous brown granulated material, identical to an inert aggregate, and OBW4 is an ash with a homogeneous and fine grey color.

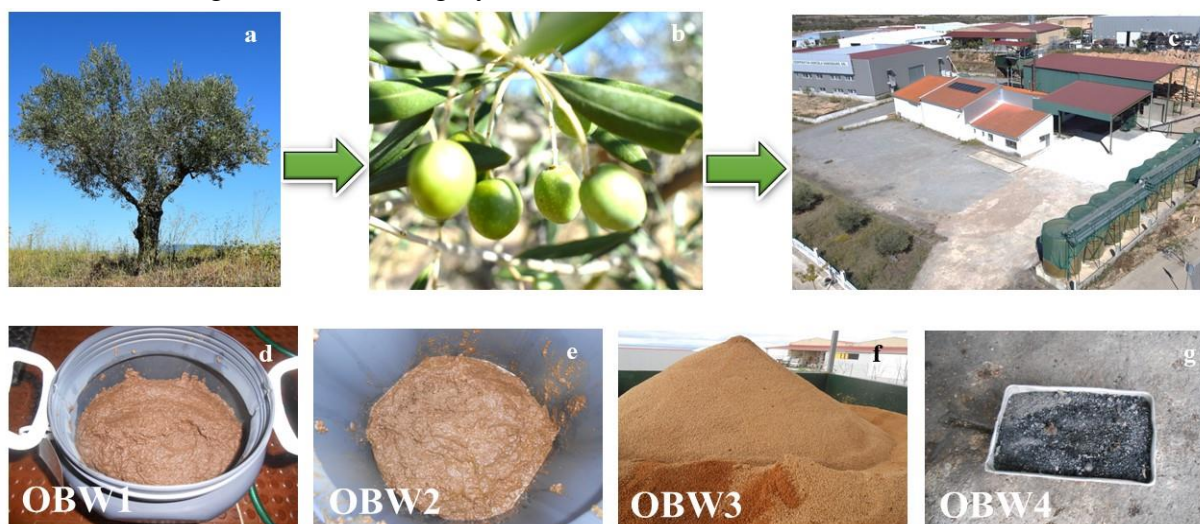


Figure 1: Olive trees a); Olive fruit b); Agricultural Cooperative Sabodouro CRL, Mogadouro, Portugal c); Representative examples of the bio-wastes employed: d) wet bagasse (OBW1); e) wet bagasse without olive stones (OBW2); f) olive stones (OBW3); g) olive stones ash (OBW4).

In this preliminary analysis of the four olive oil production wastes (OBW1, OBW2, OBW3 and OBW4) was focused on the characterization of the elemental chemical composition, density, wettability and morphology.

To determine the bulk density of the samples, the procedures referred in the EN 1097-6:2016 [26] standard were followed.

The surface wettability of the olive bio-wastes olive samples was assessed by means of static contact angle measurements using the sessile drop method. Static contact angles were measured in a temperature-controlled chamber at 26 ± 1 °C with ultra-pure distilled water using a Krüss DSA25S drop shape analyser controlled by the software ADVANCE. The volume of liquid droplets was kept constant at 5 and 2 μ L.

The pH of the bio-wastes was measured using pH test strips.

The olive bio-wastes were observed with a magnifying glass (Nikon SMZ800) and photographed with a digital camera (RisingCam).

SEM images were also obtained at 20 kV on a Hitachi S-3400N type II microscope equipped with a Bruker x-flash 5010 at high vacuum. The sample was coated with gold prior to being analyzed.

Results and discussion

The chemical characterization allowed to conclude that all bio-wastes are constituted mostly by carbon and oxygen. OBW4 is also composed by potassium and calcium in significant amounts. The identification of the chemical composition of this type of organic wastes is fundamental for a better understanding of the chemical reactions that may occur upon incorporation into the final mixtures, namely in the presence of common binders, such as cement and lime. Furthermore, it should also be taken into consideration when evaluating its influence on the hardening process of cement-based material.

The determination of the bulk density of the bio-waste samples will be an asset to define the possibilities of application as material components, regarding structural or non-structural purposes. It may also be a valuable indicator of mechanical, thermal and acoustic performance. The values obtained for the bulk density are presented in Table 1 and compared with others available in the literature. The values of the bio-wastes under study varied between 1000-2000 kg/m³. These findings lead us to conclude that they can be considered as lightweight materials when compared to current materials, such as cement (3000 kg/m³) [27].

Table 1: Bulk densities values of some bio-waste residues of olive oil industries.

Bio-waste	Bulk Density (kg/m ³)	Reference
OBWO1	1134.268 ± 0.771	This work
OBWO2	1230.285 ± 0.706	
OBWO3	1191.566 ± 1.607	
OBWO4	1274.799 ± 1.643	
Calcined Olive stones	616.00	[28]
Olive pruning waste	1251	[29]

The determination of the static contact angles between a solid surface and a liquid gives a reliable information about the wettability of the surface. A surface is classified as hydrophilic when the contact angle is < 90° and hydrophobic when the contact angle is > 90°. When the contact angle is < 10° or >150°, it is called superhydrophilic or superhydrophobic, respectively [30].

All the bio-waste samples studied exhibit superhydrophilic behaviour (Figure 2). In fact, water drops spread out flat on their surface independently of the drop volume (Figure 3).

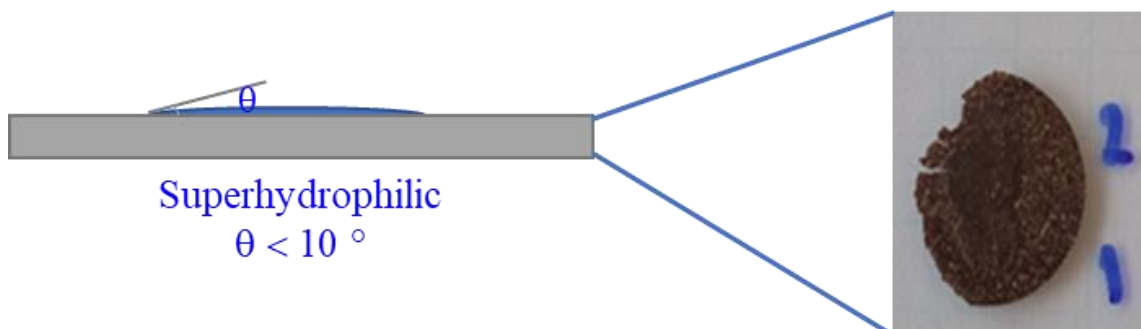


Figure 2: Schematic illustration representing the contact angles of OBW4 with the superhydrophilic character.

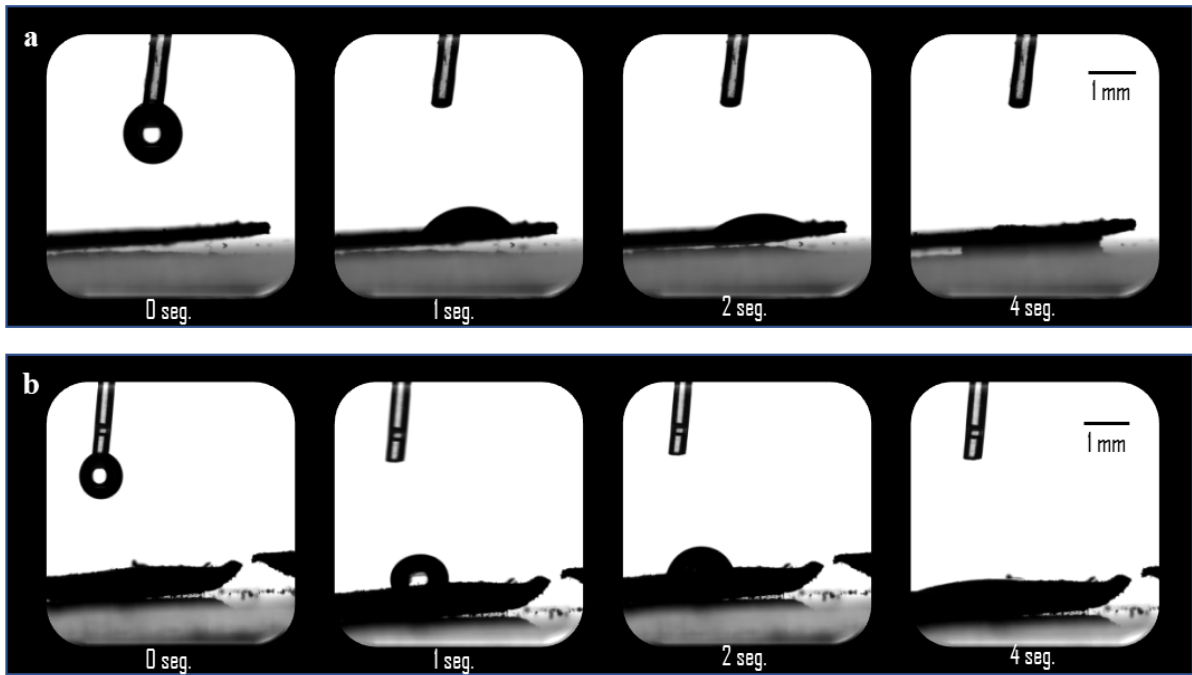


Figure 3: Contact angle measurement images for 0, 1, 2 and 4 seconds: a) OBW3 and b) OBW4.

Information on the surface wettability of bio-wastes plays an important role regarding materials behaviour, especially when used as aggregates in mortars or concrete, as in this case, as they are superhydrophobic, they will absorb water from the mixture. This water absorption may interfere with the hydration of binders such as cement and lime.

The pH values of OBW1 and OBW2 were evaluated *grosso modo* with pH strips. Values between 4 and 5 were found, thus indicative of acidic behaviour. It is of interest to note that olive oil wastewater displays pH=4-6, wet olive pomace has a pH=5-7 [31], whereas the pH of olive pulp was reported to be 5.2 and that of olive stone 5.4 [32]. This body of information is especially important when choosing the binders that can be employed in mixtures containing this type of residues. For cementitious matrices, a careful analysis is necessary, since in mixtures with acidic waters, the mechanical performance decreases [33].

The surface morphology of the present bio-wastes was inspected with a magnifying glass (Figure 4) and a scanning electron microscope (SEM) (Figure 5).

Through the use of the magnifying glass, it is possible to observe that the olive bio-wastes are quite homogeneous in each phase of the process. Comparison of Figures 4 a,b and 3c,d allows concluding that no significant differences are distinguished between OBW1 and OBW2 residues. However, in the case of OBW3 well-defined boundaries are observed in the residues (Figures 4 e,f). The appearance of ashes of OBW4 is drastically different, presenting the pasty aspect visible in Figure 4 g,h.

The representative SEM images reproduced in Figure 5 corroborate the conclusions retrieved with the magnifying glass. The OBW4 sample presents a very compact structure (Figure 5c).

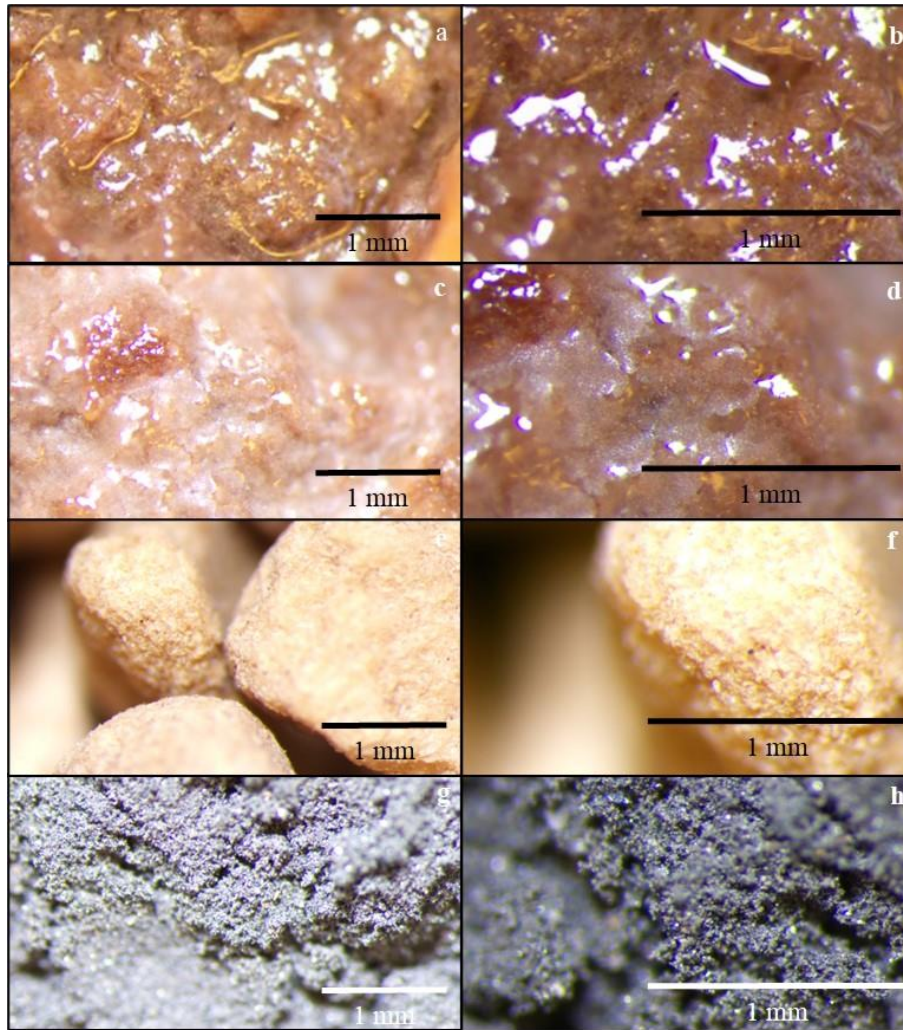


Figure 4: Representative images of the bio-wastes observed with a magnifying glass: OBW1 a), b); OBW2 c), d); OBW3 e), f); OBW4 g), h).

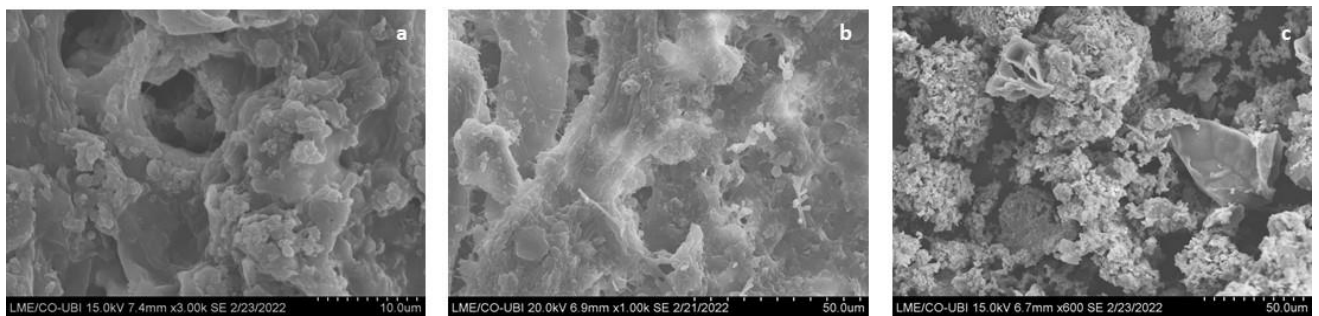


Figure 5: SEM images of the bio-wastes OBW2 a); OBW3 b) and OBW4 c).

Conclusions

A careful characterization of bio-wastes, including those derived from the olive oil production, is of the utmost interest to evaluate their potential as attractive candidates in building materials. In the present work the first results of the determination of the density, the assessment of wettability, and the evaluation of the morphology of four bio-waste samples linked to four different stages of the production of olive oil are reported. As the olive bio-wastes analysed present bulk densities in the 1134 and 1275 kg/m³ range, they may be considered as lightweight materials when compared to current materials used in the construction sector, such as, for example, cement (3000 kg/m³). The four wastes display homogeneous texture, and they all present a super-hydrophilic nature. OBW1 and OBW2 have acidic character. The assessment of wettability through the contact angle technique

is not widely used in the characterization of bio-wastes but it can be very useful to predict their behaviour (surface water absorption) when they are used as raw materials for building solutions. Based on the obtained results, several applications of these bio-wastes in construction materials can be proposed. While OBW1, OBW2 and OBW4 might be employed in blocks or mortars, OBW3 would be more suitable to produce panels or floors.

More detailed studies on the chemical composition, physical properties, microstructure, and biological attacks, among others, are required to identify the most suitable applications in the construction industry.

Acknowledgements

This work was developed under the projects UIDB/00616/2020 and UIDP/00616/2020 for the Unit Institute CQ-VR and by the Project OBTAIN, Objective Building Sustainability (NORTE-010145-FEDER-000084). M. Fernandes acknowledges FCT-UTAD for the contract in the scope of Decree Law n. ° 57/2016 – Law n. ° 57/2017.

Funding

This work was financed by the I&D Project OBTAIN- Objective Building Sustainability operation no. NORTE-01-0145-FEDER-000084, co-financed by the European Regional Development Fund (FEDER) through NORTE 2020 (Northern Regional Operational Program 2014/2020).

References

- [1] Nações Unidas, <https://unric.org/pt/populacao-mundial-atinge-os-oito-mil-milhoes-em-novembro/>, em 10/10/2022.
- [2] União Europeia, https://ec.europa.eu/eurostat/statisticsexplained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation, em 10/10/2022.
- [3] M. V. Madurwar, R. V. Ralegaonkar, S. A. Mandavgane, *Application of agro-waste for sustainable construction materials: A review*, Construction and Building Materials (2012) 872-878.
- [4] C. Maraveas, *Production of Sustainable Construction Materials Using Agro-Wastes*, Materials 13, 262, (2020).
- [5] R. Khan, A. Jabbar, I. Ahmad, W. Khan, A. N. Khan, J. Mirza, *Reduction in environmental problems using rice-husk ash in concrete*, Construction and Building Materials, 30 (2012) 360-365.
- [6] R. C. Kanning, K. F. Portella, M. O. Bragança, M. M. Bonato, J. dos Santos, *Banana leaves ashes as pozzolan for concrete and mortar of Portland cement*, Construction and Building Materials, 54 (2013) 460-465.
- [7] M. Frías, H. Savastano, E. Villar, M. I. Sánchez de Rojas e S. Santos, *Characterization and properties of blended cement matrices containing activated bamboo leaf wastes*, Cement and Concrete Composites, 34 (2012) 1019-1023.
- [8] N. B. Singh, S. S. Das, N. P. Singh, V. N. Dwivedi, *Hydratation of bamboo leaf ash blended Portland cement*, Indian Journal of Engineering & Materials Sciences, 14 (2007) 69-76.
- [9] N.B. Singh, V. D. Singh, S. Rai, *Hydration of bagasse ash-blended portland cement*, Cement and Concret Research, 30 (2000) 1485-1488.

- [10] S. M. S. Kazmi, S. Abbas, M. Munir, A. Khitab, *Exploratory study on the effect of waste rice husk and sugarcane bagasse ashes in burnt clay bricks*, Journal of Building Engineering, 7 (2016) 372-378.
- [11] A. Paiva, S. Pereira, A. Briga-Sá, D. Cruz, H. Varum, J. Pinto, *A contribution to the thermal insulation performance characterization of corn cob particleboards*, Energy and Buildings, 45 (2012) 274-279.
- [12] J. Pinto, A. Briga-Sá, S. Pereira, I. Bentes, A. Paiva, *Possible Applications of Corncob as a Raw Insulation Material*, em *Insulation Materials in Context of Sustainability*, InTechopen. Edited by Amjad Almusaed and Asaad Almssad, ISBN: 978-953-51-2625, (2016), DOI: 10.5772/62339.
- [13] J. Faustino, L. Pereira, S. Soares, D. Cruz, A. Paiva, H. Varum, J. Ferreira, J. Pinto, *Impact sound insulation technique using corn cob particleboard*, Construction and Building Materials journal, 37 (2012) 153-159.
- [14] R. Dungani, M. Karina, Subyakto, A. Sulaeman, D. Hermawan, A. Hadiyane, *Agricultural Waste Fibers Towards Sustainability and Advanced Utilization: A Review*, Asian Journal of Plant Sciences, 15 (2016) 42-55.
- [15] K. Ghavami, *Bamboo as reinforcement in structural concrete elements*, Cement and Concrete Composites, 27 (2005) 637-649.
- [16] Y. Li, Y. Mai, L. Ye, *Sisal fibre and its composites: a review of recent developments*, Composites Science and Technology, 60 (2000) 2037-2055.
- [17] C. Shon, T. Mukashev, D. Lee, D. Zhang, J. R. Kim, *Can common reed fiber become an effective construction Material? Physical, mechanical, and thermal properties of mortar mixture containing common reed fiber*, Sustainability, 11 (2009) 03.
- [18] P. Shafigh, H. B. Mahmud, M. J. Jumaat, M. Zargar, *Agricultural wastes as aggregate in concrete mixtures – A review*, Construction and Building Materials, 53 (2014) 110-117.
- [19] C. Bories, L. Aouba, E. Vedrenne, G. Vilarem, *Fired clay bricks using agricultural biomass wastes: Study and characterization*, Construction and Building Materials, 91 (2015) 158-163.
- [20] M. Sutcu, S. Ozturk, E. Yalamac, O. Gencel, *Effect of olive mill waste addition on the properties of porous fired clay bricks using Taguchi method*, Journal of Environmental Management, 181 (2016) 185-192.
- [21] F. Barreca, C. R. Fichera, *Use of olive stone as an additive in cement lime mortar to improve thermal insulation*, Energy and Buildings, 62 (2013) 507-513.
- [22] Sustaine Olive, <https://sustainolive.eu/importance-olive-grove-mediterranean-basin/?lang=en>, em 10/10/2022.
- [23] INE, https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0000705&selTab=tab0&xlang=pt, em 14/10/2022.
- [24] G. Rodríguez, A. L. R. Rodríguez, A. J. R. Guillén, J. Fernández-Bolaños, *Olive stone an attractive source of bioactive and valuable compounds*, Bioresource Technology, 99 (2008) 5261-5269.
- [25] Agroportal, <https://www.agroportal.pt/sector-do-azeite-esta-a-colapsar-devido-ao-excesso-de-producao-de-azeitona/>, em 14/10/2022.

- [26] CEN, *EN 1097-6:2016 Tests for mechanical and physical properties of aggregates - Part 6: Determination of particle density and water absorption*, CEN, Bruxelas, (2016).
- [27] Secil, <https://www.secil-group.com/produtos-e-servicos/cimentos-e-cal>, em 10/03/2022.
- [28] M. del Río Merino, J. Guijarro Rodríguez, F. Fernández Martínez, J. Santa Cruz Astorqui, *Viability of using olive stones as lightweight aggregate in construction mortars*, *Revista da Construção* 16 (2017) 431-438.
- [29] S. Liuzzi, C. Rubino, P. Stefanizzi, A. Petrella, A. Boghetich, C. Casavola, G. Pappalettera, *Hygrothermal properties of clayey plasters with olive fibers*, *Construction and Building Materials*, 158 (2018) 4-3.
- [30] S. Parvate, P. Dixit, S. Chattopadhyay, *Superhydrophobic surfaces: insights from theory and experiment*, *Journal of Physical Chemistry B*, 124 (2020) 1323–1360
- [31] A. Khdair, G. Abu-Rumman, *Sustainable Environmental Management and Valorization Options for Olive Mill Byproducts in the Middle East and North Africa (MENA) Region, processes*, 8 (2020).
- [32] M. M. Solé, L. Pons, M. Conde, C. Gaidau and A. Bacardit, *Characterization of Wet Olive Pomace Waste as Bio Based Resource for Leather Tanning*, *Materials*, 14 (202) 790.
- [33] I. T Wicaksono, R Nurwidayati, *The Effect of pH Water on the Concrete Mixtures and Curing Condition on the Compressive Strength of Concrete*, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 999 (2022) 012006.6.

Intelligent System for Curing and Monitoring a Waterproof Membrane

MIDÃO M.^{1,a}, FERREIRA C.^{1,b}, ROCHA M.^{1,c}, RIBEIRO J.^{1,d}, RODRIGUES J. M.^{1,e}, SÁ I.^{1,f}, SILVA A.^{2,g}, MORGADO J.^{2,h}, COSTA L.^{2,i}, RODRIGUES F.^{2,j}, AFONSO A.^{3,k}, VENTURA S.^{3,l}, ABREU J.^{3,m} and SILVA L.^{4,n}

¹ CENTITVC - Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes, Rua Fernando Mesquita, nº 2785, 4760-034, Vila Nova de Famalicão, Portugal

² CITEVE – Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário de Portugal, Rua Fernando Mesquita, nº 2785, 4760-034, Vila Nova de Famalicão, Portugal

³ TEXTEIS PENEDO S.A., Rua da Liberdade, nº 341, Mascotelos, 4835-132, Guimarães, Portugal

⁴ Saint-Gobain Portugal S.A., Zona Industrial Taboeira, 3800-055, Esgueira, Aveiro

^ammidao@centi.pt, ^bcferreira@centi.pt, ^cmrocha@centi.pt, ^djpribeiro@centi.pt, ^ejmrodrigues@centi.pt, ^fisa@centi.pt, ^gasilva@citeve.pt, ^hjmorgado@citeve.pt, ⁱlcosta@citeve.pt, ^jfrodrigues@citeve.pt, ^kAgostinho.Afonso@tpenedo.pt, ^lsandra.ventura@tpenedo.pt, ^mjoao.abreu@tpenedo.pt, ⁿLuis.Silva@saint-gobain.com

Keywords: Waterproof membrane, infrared reflective surfaces and additives, textile sensors, moisture, temperature, heating system

Abstract. During the past years, roof structures are evolving to provide new waterproofing materials that increase the comfort of homes and roofs' life span. Existing market roof waterproofing solutions present some anomalies related to water infiltrations resulting from roof cracks, which reduces the durability and robustness of the structure. Thereby, the main goal of this project is to develop an innovative roof waterproofing system composed of a water-based polymeric membrane with infrared reflective additives, reinforced with a smart textile substrate with coupled moisture and temperature sensors to monitor infiltrations. Furthermore, the smart reinforcement textile presents a textile-based heating system able to accelerate the membrane curing process during application and reduce infiltration events. The resultant product mitigates cracking and reduces durability problems of the water-based polymeric membrane, demonstrating that the NIR reflective pigments synthesized can be used as cool pigments. Also, the innovative textile sensors developed for this project were successfully embedded in the target textile substrate and could successfully sense and monitor the moisture and temperature inside the structure. The heating wires showed to be capable of accelerating the membrane cure process.

Introduction

As part of the construction, a roof is the top of a building that serves as protection against weather conditions such as rain, snow, heat/sun, and wind. Watertightness depends upon the performance of waterproofing materials, either traditional solutions, such as some bituminous membranes, or non-traditional, such as liquid products or systems below [0]. Another important feature is the ability of the roof surface to reflect the incoming sunrays to prevent/dissipate heat and keep the roof fresher than a conventional one, even when subjected to high values of solar radiation [0]. Research development and innovation in the field of building materials have led to the emergence of new waterproofing materials that can be applied in mono or multi-layer systems where each layer has a specific function [0].

The waterproofing solutions available on the market are mainly of two types: prefabricated (roller membranes) such as asphalt, PVC or Polyurea fabrics and liquid membrane solutions (mortar) [0,0]. The solutions that Saint-Gobain Weber Portugal [0] currently commercializes are liquid polymer membranes - acrylic or polyurethane resins - solvent-based. The solvent base

solution incorporating polyurethane (PU) [0] has satisfactory technical performance but is an imported product requiring a specific production process. Furthermore, during the application, it requires additional safety conditions mainly due to emissions of VOC (Volatile Organic Compounds) and the potential presence of isocyanates that are very harmful to the health of the applicator [0]. The development of liquid membrane solutions in the aqueous dispersion is crucial to present more sustainable and less polluting solutions. This type of membrane is easier to formulate and has a high elasticity [0]. However, it still has performance and durability limitations when compared to other liquid-based waterproofing solutions. Its use is limited when it requires resistance to the action of atmospheric agents and superior mechanical resistance, mainly when applied on roofs, and where it becomes extremely necessary to its watertightness and consequently high cracking resistance [0]. In addition, the existing solutions have different colors[0,0], ensuring greater reflectance, lower thermal amplitudes in materials and, consequently, lower risk of cracking [0].

Given the presented, Smart Roof System project intends to develop a waterproofing system composed of a water-based polymeric membrane with infrared (IR) reflective additives that presents equivalent technical performance to the best solutions of liquid membrane solvent-based, with the environmental and health advantages referred above. Furthermore, this membrane should be reinforced with a smart textile substrate used to optimize the advantages of this innovative waterproofing, thermal reflective and fast drying water-based polymeric membrane. Specifically, this contribution presents the synthesizing of NIR reflective pigments that will be used in the development of colored water-based membranes with reflective capabilities. This article also presents the integration of an active heating system with temperature and moisture textile sensors on the reinforcement textile.

Degradation agents in waterproofing membranes include solar radiation, temperature and relative humidity fluctuations and the action of rain. The solar spectrum consists in solar radiation that reaches the solar surface and includes ultraviolet (UV), visible light (Vis) and infrared (IR) radiation.

The solar radiation incident on a surface can be absorbed, transmitted and/or reflected. Darker colors have higher absorption coefficients, and thus tend to show higher anomalies, due to cracking and subsequent water infiltration, through the cracked zones. To reduce these defects ETAG005 refers to the use of solar reflective coatings, through the incorporation of cool pigments, for the purpose of protection against solar radiation [0].

In terms of black or grey reflective pigments, compounds such as iron and chromium oxide, iron titanate, or manganese and yttrium oxide are widely used. However, the former contains chromium – a toxic substance – while the others present performance limitations. A usual strategy to obtain black or grey cool pigments is through mixing *carbon black* pigment with titanium dioxide, however, this has an impact on performance. Oka et al [0] reported the preparation of black cool pigments based on calcium and manganese oxide by the solid synthesis technique (high-temperature calcination). These were further optimized by the partial replacement of manganese (IV) with titanium (IV), achieving a near infra-red (NIR) zone reflectance like titanium dioxide. To obtain orange/brick color pigments, several synthesis alternatives are available in the literature. A promising solution emerges from the work from Huang *et al.* [0], starting from lanthanum and cerium mix oxide ($\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$) that was doped with Pr^{4+} and Tb^{4+} to obtain novel inorganic pigments with outstanding NIR solar reflectance.

The use of heating systems is increasingly found in routine activities such as space and water conditioning, car seats and blankets heating, drying objects, and even cooking [0,0]. All these systems are generally made up of electrical/electronic elements that allow converting electrical energy into heat. Usually, these heating elements are made up of bulk electronics, however different applications are incompatible with them, such as the development of wearables or heating blankets. In these applications, it is necessary to use more flexible and less perceptible elements for the user and must adapt to different geometries, promoting greater comfort. For these, copper and stainless steel are used as metallic base wires [0,0] and conductive wires with carbon as polymer solutions

[0]. There are already some suppliers of that type of technology as Arkon Heating, which sells heating fabrics as the HeizTex ® Mesh [0] consists of a perpendicular weave of fiberglass yarn and electrically conductive polymer yarn. The mesh ensures high stability as well as lower energy consumption, and the heating range is limited to 110 °C. Also, Gerster TechTex [0] works with smart technical textiles using carbon fibers, which have good thermal conductivity and heat resistance and are ideal for use as a heating element.

Several sensors, such as temperature, humidity, moisture, light, and touch, are used to solve routine or technical problems. However, many of the solutions require the use of seamless and flexible sensors that allow for good comfort. In this way, the development of textile sensors has proved to be a powerful tool, as it makes possible the integration of sensing in applications, whose conventional electronics could compromise the functionality of the products, such as garments and blankets [0].

In addition to yarn temperature and humidity/moisture sensors, it is already possible to identify many developments made either for wearable applications or integration in reinforcement structures [0,0]. However, many of the applications are restricted to integration through embroidery processes, where the conductive yarn is applied, making up the intended design. On the other hand, there are few developments made in which sensors are directly integrated into the weaving or knitting processes during the production of the target textile [0,0]. Relatively to the yarn temperature sensors, the metallic-based materials conventionally used are stainless steel fibers, copper, nickel, and tungsten [0]. Also, textile fibers with conductive particles, such as silver [0] have been studied. On the other hand, for humidity sensors, the conductive wires that tend to be commonly used are metallic based, namely copper wires for the electrodes and viscose as the dielectric material [0]. It is possible to find some studies using textile yarns added with conductive silver particles [0].

Results show that the synthesized NIR reflective pigments present a high potential to be used as cool pigments. Regarding the monitorization of moisture and temperature, the innovative textile sensors developed for this project were successfully integrated with the waterproof structure and could sense moisture and temperature successfully. Furthermore, the heating system showed to be capable of accelerating the curing process of the waterproofing membrane.

Smart Roof System

This section presents a detailed explanation of the developed moisture and temperature monitorization system. The Smart Roof System illustrated in Figure 1, represents a conventional flat roof composed of 4 layers. The first one is concrete, followed by an insulation board. On top of that, it is possible to find 2 layers of cement mortar reinforced with a fiberglass mesh. The last component, which is the subject of investigation in this contribution, is constituted by two layers of a waterproofing membrane reinforced with a smart textile. This smart textile includes temperature and humidity textile sensors, as well as heating wires for fast-drying and moisture control. This innovative reinforcement textile was created to improve the mechanical properties of the membrane, maintain sufficient strength after loss of resistance caused by the alkaline environment and enhance the fast-drying process of the membrane.

Following, the different components of the presented waterproofing membrane reinforced by smart textile, are explained in detail, highlighting all the innovative aspects of this intelligent structure.

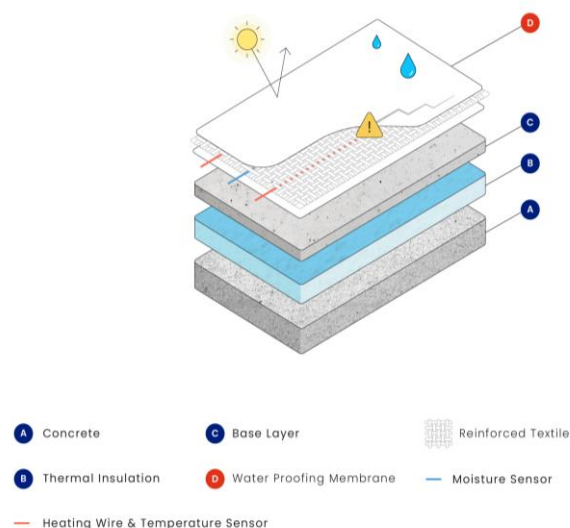


Figure 1: Smart Roof System.

Synthesis and benchmark of pigments. The grey pigments were synthesized by a composite co-precipitation method. These core-shell pigments have a titanium dioxide core (TiO_2) and a copper oxide shell (CuO), with 1:0.8 molar ratio of Ti:Cu. Furthermore, the influence of calcination time in pigment properties was studied.

The orange/brick color pigments, based on bismuth ferrite (BiFeO_3) doped with lanthanum ions (La^{3+}), were synthesized by a sol-gel procedure. The effect of lanthanum in pigment properties was studied. Moreover, commercially available cool pigments were used as benchmark. Cool pigment Black 30C941 was supplied by The Sheperd Color Company. Orange cool pigments Heucodur® IR Gelb 259 was supplied by Heubachcolor.

Reinforcement textile. The development of the reinforcement textile structure for the Smart Roof System was made following some specific technical requirements such as grammage, thickness, mechanical and chemical resistance and low hydrophilicity. The need for a lightweight and flexible reinforcement textile structure that is thick enough to comply with the standard minimum thickness for reinforced waterproofing membranes (2mm), with bidirectional resistance to improve the mechanical properties of membrane and maintain sufficient strength after loss of resistance caused by the membrane alkaline environment (pH 12-14) and using yarns made with low hydrophilicity to enhance the fast-drying process of the membrane, lead to the development of the reinforcement textile used in this contribution. To achieve these goals, a woven fabric structure composed of continuous 100% recycled polyester composition filament yarns with a linear mass of 167x2 dtex and a twist of 300 turns/meter was used in the direction of the warp (19 yarns/cm), and weft (23 yarns/cm). In addition, the pattern draft and density of the developed woven fabric was defined with a small mesh pattern (1,5mm), which allows the optimal transfer of the membrane through the structure, promoting its adhesion with the textile structure.

Heating system. Regarding the development of the textile heating circuit, at an early stage, conductive wires were selected, and the main requirements of the heating system were identified. In this way, dimensions of 1 x 0.5 cm and a maximum temperature of 60 °C were defined.

Considering the imposed requirements, three textile structures were produced through the weaving of the three types of conductive wires, namely two multifilament copper wires with polymeric insulation and a non-insulated stainless-steel wire, with a spacing of 1 cm.

The samples produced helped to validate the design of the heating systems, making it possible to determine the power per area required for the solution to be developed. It should be noted that the power per area to be obtained with the tested conductive wires is transcendent to other types of conductive wires since it is not dependent on their electrical resistance but on the type of textile integration (which compromises the propagation of heat), and the desired temperature. From the integration made, the textile structures obtained are presented in Figure 2.

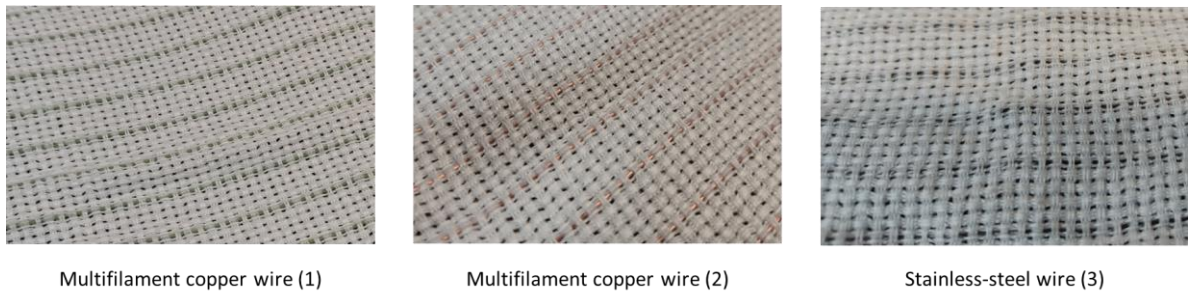


Figure 2: Integration of the multifilament copper wire (1), multifilament copper wire (2), and stainless-steel wire (3).

Subsequently, with the structures obtained, their thermal and electrical characterization was made. To this end, in the initial phase, the heating systems were divided into smaller systems and different combinations of connections were made between the systems (in parallel and series), to reduce electrical consumption as much as possible.

During the preparation of the textile structures, it was possible to verify that the multifilament copper wire (1), it was found that the most viable option for the solution would be the one that subdivides the system into 3 subsystems in series, connected in parallel. However, the voltage required was far from the pre-defined voltage for this type of system (12, 24, or 48V), not being viable for the final application.

Next, from the characterization of heating systems with multifilament copper wire (2), it was possible to verify that some of the possible approaches proved to be interesting for the application. However, despite consuming the same power, they exhibit different energy requirements, which will impact the volume of the control electronics.

Finally, the stainless-steel wire (3), which is a non-insulated multifilament steel-based wire, presented some defects and loops in the textile structure, which meant that the electrical resistance was not constant between conductive wires. In addition, it was found that in none of the approaches tested, the conductive wires reached 60 °C, which was defined as the target temperature.

Textile sensors. A temperature sensor is a device that measures a signal and produces an analogic or digital output that can be converted to the measured temperature. The two most used types are the resistive and the thermoelectric sensors. The resistive sensors use the fact that the electrical resistance varies with temperature. The thermoelectric sensors use the *Seebeck* effect, where a temperature-dependent voltage is generated between the junctions of two dissimilar metals when they are connected [16]. The resistive devices can be built from two different types of materials. The resistance temperature devices (RTDs) use metals, which have positive temperature coefficients of resistance. The thermistors with negative temperature coefficients of resistance (NTC) are based on semiconductors [17], [18]. Regarding thermoelectric sensors, the most common type is the thermocouple [19].

A humidity sensor corresponds to a device that allows one to determine the humidity of the air, being able to be calibrated for the acquisition of the relative or absolute humidity or even moisture (water content in a sample). These sensors conventionally used are capacitive devices because the capacity between two electrodes is generally very sensitive to humidity and water content. A capacitive sensor is a device that can detect solid or liquid targets without physical contact, although they are restricted to short ranges, normally below 1 cm. To detect these targets, emit an electrical field from the sensing end of the sensor. Any target that can disrupt or interrupt this electrical field can be detected by this sensor

Temperature sensor. Regarding the textile sensor's developments, different conductive wires were identified and selected. Thus, for the study and understanding of the behavior and performance of the respective sensors, after their integration into the textile reinforcement structure that will be implemented in the final solution, preliminary tests were made. This characterization was divided into the evaluation of the sensors' response regarding the change in temperature and humidity conditions (during membrane drying). To perform this test, a commercial sensor integrated into the membrane was used simultaneously with the textile sensor, allowing the analysis of the mentioned relationship.

The approach adopted for temperature sensors was based on resistive temperature sensors, using nickel wire (Ni). The selection of this conductive wire was related to the high sensitivity and stability that this Ni yarn presents compared to stainless steel and tungsten conductive wires. However, due to its fragility, resulting from its reduced thickness, a previous twist with a textile fiber was necessary.

Moisture sensor. The moisture sensing approach also includes the identification and selection of different functional wires, among which a coated copper monofilament was selected to use as electrodes, ensuring that it would not oxidize in the presence of water. In addition, a study of textile fibers that could be introduced between the electrodes and could absorb water was also made to optimize the sensitivity of the sensor. That said, it was found that rayon could be a good alternative. Similar to the temperature sensors, the wires (1 m of length) were integrated into the target textile structure through a manual cording process.

Results and discussion

This section presents the results obtained in the synthetization of inorganic pigments. Next, the results related with the acceleration of the membrane cure process are presented. Finally, the response of the textile sensors when integrated with the waterproofing membrane is introduced.

IR reflective pigments. Regarding the scope of the project in which this work is developed, it's intended to use colored (grey and brick) IR reflective pigments in the development of cool coatings. Grey synthesized pigments have a titanium dioxide core (TiO_2) and a copper oxide shell (CuO) (Figure 3 - Left) and were obtained after optimization of the calcination time. The brick-colored synthesized pigments (Figure 3 - Right) are based on bismuth ferrite (BiFeO_3) doped with lanthanum ions (La^{3+}).



Figure 1: Left: Photograph of grey-colored titanium dioxide core (TiO_2) and a copper oxide shell (CuO) powder pigment calcinated as 500°C for 2h (left) and 4h (right); Right: Photograph of $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{FeO}_3$ ($x=0.2$ or 0.4) orange-colored pigments.

Chromatic properties analysis. The chromatic coordinates L^* , a^* , b^* and C^* of the grey-colored and brick-colored pigments and similar conventional black pigment are given in Table 1.

Table 1: Chromaticity coordinates, L^* , a^* , b^* and C^* of grey and brick powder pigments

Sample	Optimization variable		L^*	a^*	b^*	C^*	ΔE
	Variable	value					
G1	Calcination time (h)	2	42.2	1.6	2.6	3.1	3.4
G2		4	41.8	1.5	2.4	2.9	3.3
Conventional pigment	-	-	42.3	0.1	-0.4	0.4	-
B1	La (x)	0.2	0.2	49,7	15,7	15,4	22,0
B2		0.4	0.4	52,0	16,0	16,8	23,1
Conventional pigment	-	-	-	70,4	20,2	43,4	47,9

For grey-colored pigments, Table 1, the increase in calcination time results in the decrease of L^* value, indicating that the lightness of samples become darker. Moreover, a decrease in a^* and b^* values, shows that the redness and yellowness of the pigments are reduced, when calcination time is double. Additionally, the decrease in C^* value, indicates that the pigment color is less saturated.

Regarding brick-colored pigments, Table 1, increasing La^{3+} doping, results in a L^* increase, which translates in a brighter sample color. An increment in a^* value shows that the redness of the pigments is increased. Also, the doping results in an increment of the yellowness of the pigment, due to the increase in b^* value. There's also an increase in color saturation, due to the rise in the C^*

value. Comparing both synthesized pigments to a conventional pigment, it's observed a difference in all chromaticity coordinates. The reduction of L^* implies that the synthesised pigments are darker than conventional pigments. On the other hand, the inferior values in a^* , b^* and C^* , translates in a reduced redness, yellowness, and color saturation, compared to conventional pigments.

NIR reflectance analysis of the powdered pigments. The NIR reflectance spectra of the grey-colored and brick-colored pigments and similar conventional black pigment are given in Figure 4. Regarding grey-colored pigments a similar behaviour in NIR reflectance is observed, regarding the calcination time (2 or 4 h). Nonetheless, the reflective properties of TiO_2/CuO core-shell pigments are higher than conventional pigments. Thus TiO_2/CuO core-shell pigments present a NIR reflectance (Table 2) up to 52 %, while conventional black pigments only 38%.

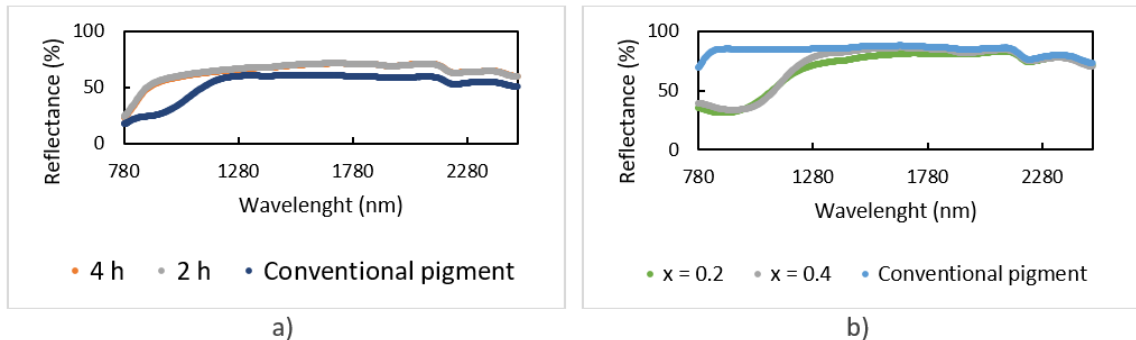


Figure 4: NIR reflectance spectra of powder pigments: a) the grey-colored core/shell (TiO_2/CuO) powder pigment samples and similar conventional black pigment; b) $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_3$ ($x=0.2, 0.4$) powder pigments samples and similar conventional pigment.

Table 2: NIR reflectance of the grey-colored core/shell (TiO_2/CuO) and $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_3$ ($x=0.2, 0.4$) powder pigment samples and similar conventional black pigment

Sample	Optimization variable		NIR Reflectance (%)
	Variable	value	
G1	Calcination time (h)	2	52
G2		4	
Conventional pigment	-	-	38
B1	La (x)	0.2	50
B2		0.4	52
Conventional pigment	-	-	81

In the NIR reflectance spectra of the $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_3$ ($x=0.2, 0.4$) powder pigments samples (Figure 4), from 1180 to 1900 nm it's noticeable a proportional relation between the proportion of La^{3+} in the pigments and it's reflectance percentage. Thus, the increase of La^{3+} from 0.2 to 0.4 results in an increase of $\text{Bi}_{1-x}\text{La}_x\text{O}_3$ pigment NIR reflectance (Table 2) of 2%, being the maximum of 52% NIR reflectance obtained when $x = 0.4$. Despite conventional pigment having higher reflective capabilities, 81%, from the NIR reflectance spectra (Figure 4) it's noticeable that doping can increase the reflective power of pigments, from 1180 nm, bringing it to values near the commercial pigment, while maintaining a darker color (Table 1).

Accordingly, to the NIR reflectance properties both pigments have potential to be used as cool pigments. Thus, in future studies, these pigments will be used to obtain grey and brick water-based polymeric membranes with improved reflectance properties.

Heating system. Regarding the results of the heating system, it was found that the most promising conductive wire was the multifilament copper wire (2), being the one where 48V can be applied because it required a lower current for its operation.

To evaluate the impact of heating on the curing of the membrane, a characterization comparing a system with and without heating was made, during the application of the membrane at room temperature ($\approx 20^\circ\text{C}$). To this end, a layer of the membrane was applied on an EPS (Expanded Polystyrene) surface, the textile structure on the membrane layer (turning on the system with heating), was left to cure for about 30 min, and the second layer was applied (divided into 2

applications). To monitor the temperature of the structures over time, a FLIR thermal camera was used, as can be seen in Figure 5.

According to the graph, it is possible to validate that the heating causes a considerable decrease in the curing time of the membrane when compared to the control. Also, the quality of the final membrane layer was evaluated at the end of the test, and after one month of the test, being possible to validate that there were no cracks in the tested samples.

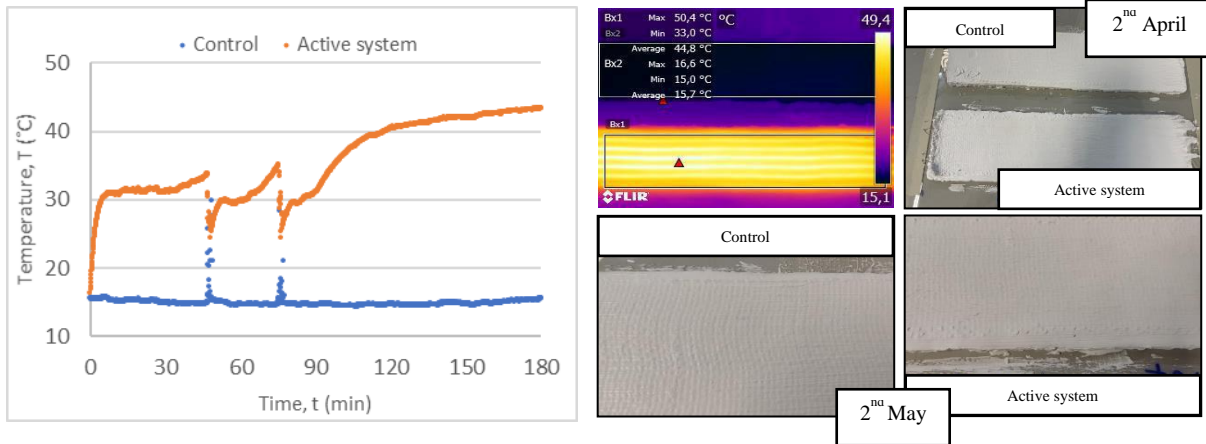


Figure 5: Monitoring the drying of a membrane sample with heating (active system) and without heating (control).

Temperature sensor. The yarn was twisted with a PET fiber in S direction. After the previous twist, two samples of nickel sensor were integrated into the target woven, through a manual cording process, and membrane (Figure 6), considering the length defined for the prototype (1 m) and was tested in a climatic chamber according to the thermal cycle shown in Figure 7.

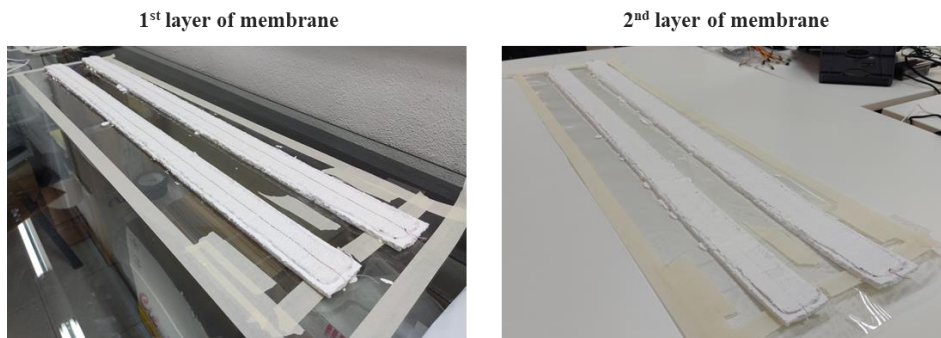


Figure 6: Textile temperature sensors are integrated into the waterproofing membrane.

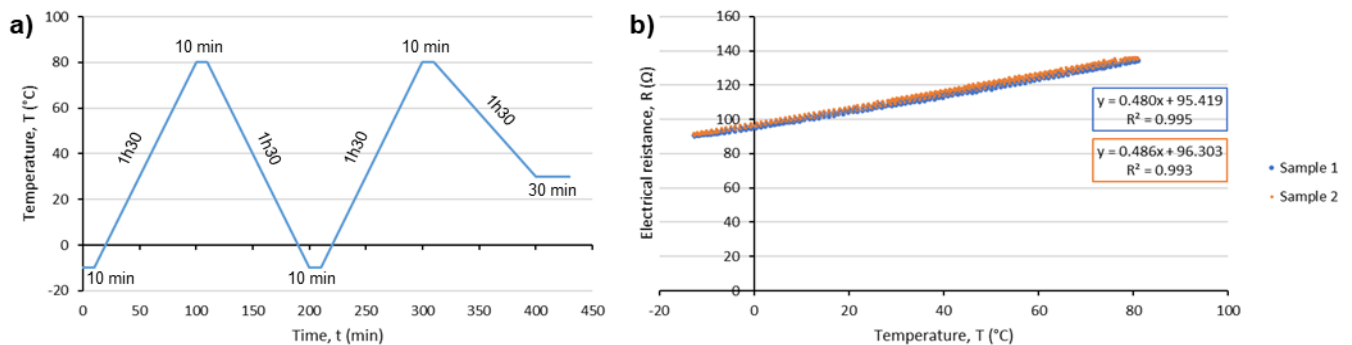


Figure 7: a) Thermal cycle and b) Ni sensor results.

According to the results presented in the graph of Figure 7 b), a very stable behavior is observed for both sensors, demonstrating that, despite the application of different thermal cycles, the sensor response is identical at the same temperatures. In addition to their stability, it is also visible reproducibility between sensors, both of which present a considerable average sensitivity close to $0.5 \Omega/^\circ\text{C}$, which guarantee a good precision for the electronics' control.

Moisture sensor. The moisture sensing approach also includes the identification and selection of different functional wires, among which a coated copper monofilament was selected to use as electrodes, ensuring that it would not oxidize in the presence of water. In addition, a study of textile fibers that could be introduced between the electrodes and could absorb water was also made to optimize the sensitivity of the sensor. That said, it was found that rayon could be a good alternative. Similar to the temperature sensors, the wires (1 m of length) were integrated into the target textile structure through a manual cording process. This integration was done to assess if, in the linear design (Figure 8), the capacity variations were significant. On the other hand, a commercial humidity sensor was integrated into the membrane at the same time to establish the relationship between the variations in capacity and humidity.

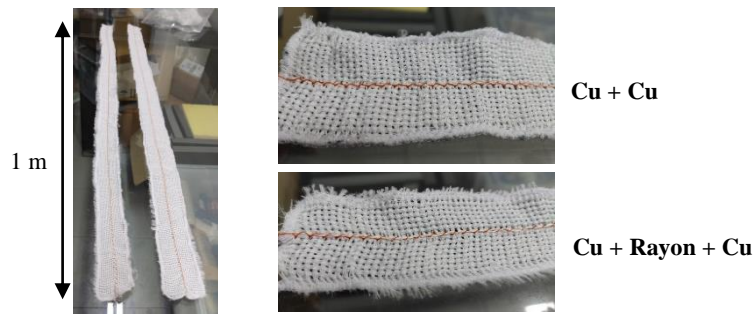


Figure 8: Textile humidity sensors with linear design.

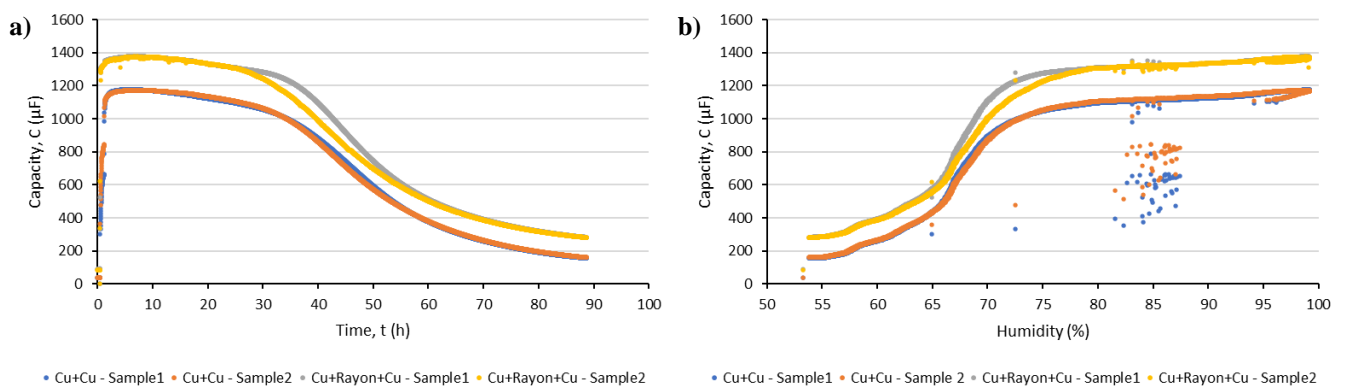


Figure 9: Variation of the capacity of textile sensors relative to a) time and b) humidity, with the linear design during the drying of the membrane.

According to the results observed in Figure 9 a), it is possible to identify good stability and reproducibility between the same typology sensors, being evident in the case of Cu + Rayon + Cu a slight difference during the drying process, possibly due to differences in the membrane integration of sensors. In addition to this aspect, a large variation in the sensor capacity is noticeable with the drying process ($\Delta C \approx 1000 \mu\text{F}$), identifying a slightly higher sensitivity in Cu + Rayon + Cu samples. Figure 9 b) show that some points are distant from the main behavior of the sensor, corresponding to the initial phase of membrane application. Also, it was possible to verify that there is no proportional relationship between the capacity and humidity. In addition, even after about 88 hours of drying, the relative humidity was never below 50% (approximately ambient relative humidity). Thus, it can be concluded that the test that has been presented has some gaps, considering that the main objective in monitoring the membrane drying corresponds to variations in the mass of water in the sample and not water vapor content in the air.

Conclusions

This contribution presented an advanced waterproofing system that innovates in the synthetization of cool pigments and in the successful integration of a heating system, temperature and moisture sensors directly in the reinforcement textile.

Specifically, NIR reflective grey-colored inorganic pigments and brick-colored pigments were synthesized by composite co-precipitation and sol-gel procedures, respectively. Grey pigments

presented darkness levels like conventional commercial pigments but higher NIR reflective capabilities. Brick-colored pigments shown similar NIR reflection properties relative to conventional pigments above 1180 nm, while displaying a darker color. Thus, both types of inorganic pigments showed potential to be used as cool pigments.

On the other hand, it was demonstrated that textile sensors work as indicators of the degree of drying and temperature in the system for application of new layer of the waterproofing membrane. Also, the continuous monitorization of the signals coming from sensors will be indicators of a potential or existent rupture of the system with water infiltrations. Furthermore, the developed heating system proved to be capable of accelerating the curing time of the membrane when compared with the control.

Regarding future work, several steps will be taken or are already underway. In fact, further studies regarding the optimization of NIR properties of the synthesized pigments, namely on Ti:Cu molar ratio and calcination conditions, are ongoing. Studies regarding the optimization of NIR properties of the synthesized pigments, namely on La³⁺ molar ratio, are ongoing. Regarding the heating system, the next steps will consist of evaluating the drying of these structures at different ambient temperatures to simulate extreme environments and validate the quality of the membrane when exposed to accelerated drying. Moreover, tests will be performed to monitor the water mass loss during the drying process, and how it can be related to the sensor capacity variation.

Acknowledgments

This work was developed in the framework of SMART ROOF SYSTEMS project (n.46957), which was co-financed by Portugal 2020, under the Operational Program for Competitiveness and Internationalization (COMPETE 2020) through the European Regional Development Fund (ERDF).

References

- [1] De Silva N. and Ranasinghe M., *Maintainability of reinforced concrete flat roofs in Sri Lanka*, Structural Survey, 28(4) (2010) 314-329.
- [2] Akbari, H. and Levinson, R., *Evolution of Cool-Roof Standards in the US*, Advances in Building Energy Research, 2(1) (2008) 1-32.
- [3] Espinosa-Fernández, A., Echarri-Iribarren, V. and Sáez, C., *Water-Covered Roof Versus Inverted Flat Roof on the Mediterranean Coast: A Comparative Study of Thermal and Energy Behavior*, Applied Sciences, 10(7) (2020) 2288.
- [4] Bastos, L., *Análise comparativa de sistemas de impermeabilização*, Doctoral dissertation. Universidade de Coimbra (2014).
- [5] Dulux.com.au. 2022. Acratex® Cool Roof Commercial, <https://www.dulux.com.au/products/details/194x0302>, Accessed 23 May 2022.
- [6] Construir.saint-gobain.pt. 2022. Homepage | Saint-Gobain Portugal S.A., <https://construir.saint-gobain.pt>, Accessed 10 May 2022.
- [7] Saint Gobain. 2022. Waterproofing Membrane - weberdry PUD coat, <https://www.th.weber/en/weberdry-PUD-coat>, Accessed 24 May 2022.
- [8] Kubal, M., *Construction waterproofing handbook*, McGraw-Hill Education (2008).
- [9] PEI, L., YAO, B. and FU, X., *Study on transport of Dy(III) by dispersion supported liquid membrane*, Journal of Rare Earths, 27(3) (2009) 447-456.
- [10] Cascone, S., *Green Roof Design: State of the Art on Technology and Materials*, Sustainability, 11(11) (2019) 3020.

- [11] APOC® Coating. 2022. APOC® 273 Kool-Gray Elastomeric Roof Coating, <https://www.apoc.com/products/roof-coatings-cool-gray-premium-elastomeric-roof-coating-apoc-273>, Accessed 24 May 2022.
- [12] Berdahl, P., Akbari, H., Levinson, R. and Miller, W., *Weathering of roofing materials – An overview*, Construction and Building Materials, 22(4) (2008) 423-433.
- [13] Ramos, N., Maia, J., Souza, A., Almeida, R. and Silva, L., *Impact of Incorporating NIR Reflective Pigments in Finishing Coatings of ETICS*, Infrastructures, 6(6) (2021) 79.
- [14] Ryohei Oka, Toshiyuki Masui, *Synthesis and characterisation of black pigments based on calcium manganese oxides for high near-infrared (NIR) reflectance*, RSC Advances, 6 (2016) 90952-90957.
- [15] Bin Huang, Yu Xiao, Chao Huang, Jinqing Chen, Xiaoqi Sun, *Environment-friendly pigments based on praseodymium and terbium doped La₂Ce₂O₇ with high near-infrared reflectance: Synthesis and characterization*, Dyes and Pigments, 147 (2017) 225-233. A. Elarusi, A. Attar, and H. Lee, *Optimal Design of a Thermoelectric Cooling/Heating System for Car Seat Climate Control (CSCC)*, J. Electron. Mater., 46, no. 4, (2017)1984–1995, doi: 10.1007/s11664-016-5043-y.
- [16] G. Zhou and J. He, *Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage materials and heating pipes*, Appl. Energy, 138 (2015) 648–660, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.10.058.
- [17] S. T. A. Hamdani, A. Fernando, and M. Maqsood, *Thermo-mechanical behavior of stainless steel knitted structures*, Heat Mass Transf. und Stoffuebertragung, 52, no. 9 (2016)1861–1870, doi: 10.1007/s00231-015-1707-z.
- [18] Y. Bai, H. Li, S. Gan, Y. Li, H. Liu, and L. Chen, *Flexible heating fabrics with temperature perception based on fine copper wire and fusible interlining fabrics*, Meas. J. Int. Meas. Confed., 122, no. September 2017 (2018) 192–200, doi: 10.1016/j.measurement.2018.03.021.
- [19] Gerster, Heating Textile, <https://gerster-techtex.com/en/technical-textiles/294-2/>, accessed Aug. 25, 2022.
- [20] Arkon Heating, Electrically conductive HeizTex – Mesh, <https://www.arkonheating.com/electrically-conductive-heiztex-mesh/>, accessed Aug. 25, 2022.
- [21] A. Angelucci et al., *Smart textiles and sensorized garments for physiological monitoring: A review of available solutions and techniques*, Sensors (Switzerland), 21, no. 3 (2021) 1–23, doi: 10.3390/s21030814.
- [22] T. Grethe, S. Borczyk, K. Plenkmann, M. Normann, M. Rabe, and A. Schwarz-Pfeiffer, *Textile humidity sensors*, Symp. Des. Test, Integr. Packag. MEMS/MOEMS, DTIP 2018 (2018) 1–3, doi: 10.1109/DTIP.2018.8394188.
- [23] M. Martínez-Estrada, B. Moradi, R. Fernández-García, and I. Gil, *Impact of conductive yarns on an embroidery textile moisture sensor*, Sensors (Switzerland), 19, no. 5 (2019), doi: 10.3390/s19051004.
- [24] M. D. Husain, R. Kennon, and T. Dias, *Design and fabrication of Temperature Sensing Fabric*, J. Ind. Text., 44, no. 3 (2014) 398–417, doi: 10.1177/1528083713495249.
- [25] Ö. Atalay, S. K. Bahadir, F. Kalaoglu, and S. Vassiliadis, *Development of Textile-Based Temperature Sensor*, 5th Int. Istanbul Text. Congr. 2015 Innov. Technol. Inspire to Innov., no. March 2016 (2015) 1–5, doi: 10.13140/RG.2.1.1870.3125.

Avaliação de compatibilidade de uma argamassa de impermeabilização com várias soluções de reforço têxtil

SILVA Luis^{1, a}, SEQUEIRA Pedro^{1, b}, FERREIRA Pedro^{1, c}, AFONSO Agostinho^{2, d}, VENTURA Sandra^{2, e}, ABREU João^{2, f}, SILVA Augusta^{3, g}, MORGADO José^{3, h}, COSTA Luani^{3, i}, RODRIGUES Filipe^{3, j}, SIMÕES Inês^{4, k}, SIMÕES Nuno^{4, l}, FERREIRA César^{5, m}, MIDÃO Marta^{5, n} e RODRIGUES Juliana^{5, o}

¹ Saint-Gobain Portugal S.A., Zona Industrial Taboeira, 3800-055, Aveiro, Portugal

² Têxteis Penedo SA, Portugal

³ CITEVE – Centro Tecnológico das Indústrias Têxtil e do Vestuário de Portugal

⁴ Universidade de Coimbra, CERIS, Coimbra, Portugal

⁵ CENTITVC - Centro de Nanotecnologia e Materiais Técnicos, Funcionais e Inteligentes

^aluis.silva@saint-gobain.com, ^bpedro.sequeira@saint-gobain.com, ^cpedro.ferreira@saint-gobain.com, ^dAgostinho.Afonso@tpenedo.pt, ^eSandra.Ventura@tpenedo.pt,

^fjoao.abreu@tpenedo.pt, ^gasilva@citeve.pt, ^hjmorgado@citeve.pt, ⁱlcosta@citeve.pt,

^jfrodrigues@citeve.pt, ^kmivsimoes@itecons.uc.pt, ^lnasimoes@itecons.uc.pt, ^mcferreira@centi.pt, ⁿmmidao@centi.pt, ^ojmrodrigues@centi.pt

Palavras-chave: membrana de impermeabilização, reforço têxtil, compatibilidade, desempenho, campanha experimental.

Resumo. A utilização de membranas líquidas de impermeabilização destinadas a coberturas planas é relativamente residual no contexto português. Não obstante, um conjunto de soluções usando membranas ou telas pré-fabricadas diversas, a maioria em conformidade com a EAD 030350-00-0402 (que substitui a ETAG 005), garante elevados desempenhos. No caso de uma membrana líquida, o seu desempenho depende de vários fatores, nomeadamente o seu comportamento mecânico, das condições de aplicação, das respetivas espessuras e do tratamento de pontos singulares. Registe-se que o desempenho da solução depende também da compatibilidade entre a membrana e o sistema de reforço têxtil que a integra, com impacto ao nível mecânico, físico e químico. O presente trabalho centra-se na avaliação experimental da compatibilidade entre uma membrana líquida de base aquosa e várias alternativas de reforço têxtil. O estudo contempla soluções de reforço existentes no mercado, assim como novas soluções resultantes dos desenvolvimentos realizados no âmbito do projeto PT 2020 “*Smart Roofs System, nº 46957*”. Os resultados evidenciam a importância de detalhes, tais como a tipologia do material de reforço e a sua configuração geométrica, que podem contribuir para desempenhos significativamente melhorados, capazes de garantir maior durabilidade das soluções em contexto real.

Introdução

A impermeabilização de coberturas é um requisito básico dos edifícios necessário à garantia de estanquicidade do edifício, a salubridade dos ambientes e o conforto dos utilizadores. A tipologia de soluções de impermeabilização resulta de um conjunto de requisitos de desempenho funcional e estético, pelo que a sua apresentação se relaciona muito com a utilização específica. Por exemplo, coberturas inclinadas tendem a apresentar elementos cerâmicos ou cimentícios (telha) ou metálicos como soluções mais típicas, com preferência dependente da agressividade do clima, fatores estéticos ou históricos, custos, entre outros. No caso de soluções de impermeabilização de

coberturas planas, geralmente não contemplam a possibilidade de utilização de elementos cerâmicos ou cimentícios como revestimento final. É mais comum a utilização de telas ou membranas de impermeabilização, que podem ficar à vista ou serem revestidas, seja por defeito, no caso de cobertura invertida (com colocação de um isolante térmico sobre si), seja num contexto de uma cobertura convencional, que pode contemplar aplicação de materiais protetores (a nível mecânico, ação do vento e exposição aos raios solares), tais como pedra solta ou placas de betão simplesmente assentes. [1-7]

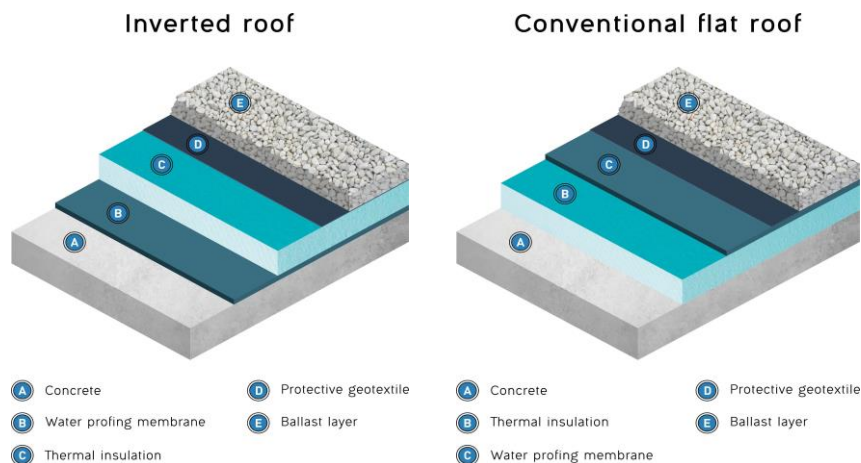


Figura 1: Desenhos esquemáticos de sistemas de impermeabilização de coberturas planas (invertida e convencional) com destaque na potencial relação entre a membrana de impermeabilização e os materiais de revestimento. [1]

No caso particular de utilização de argamassas de impermeabilização, são regulamentadas a nível Europeu e Nacional, a partir do ETAG 005, parte 8 (entretanto, substituído por EAD 030350-00-0402-*Liquid Applied Roof Waterproofing Kits*), cujas exigências implicam testes específicos e com requisitos ao nível da capacidade de impermeabilização, resistência à fissuração e indentação. Os ensaios têm ainda que ser realizados após condições de envelhecimento acelerado adicionais como exposição a radiação ultravioleta (UV), cujo comportamento final permite dar uma previsão de durabilidade de 5, 10 ou 25 anos. Exatamente por tais exigências elevadas, que se coadunam com expectativas de mercado em desempenho e durabilidade, têm surgido soluções constantemente melhoradas neste domínio. Registe-se que estas soluções também necessitam de apresentar um conjunto de especificidades que possam maximizar a sua utilização em situações como pontos singulares numa cobertura. [8]

As soluções em poliuretano, apresentadas em 2 componentes ou mono-componente de base solvente são bastantes comuns, sobretudo nas regiões mediterrâneas. Os filmes formados são pouco afetados pela água, óleos e outros químicos. Apresentam resistência à abrasão elevada, e alta elasticidade e flexibilidade a baixa temperatura e resistência à biodeterioração e a microrganismos. Apresentam baixa permeabilidade ao vapor de água e elevada durabilidade. Contêm ligações -NHCOO- nas suas cadeias e são formados pela reação de adição de di-isocianatos com compostos diol, contendo hidrogénios reativos como poliésteres, poliéteres, glicóis simples e aminas. Em adição aos grupos uretano, podem conter hidrocarbonetos alifáticos ou aromáticos, ésteres, éteres, amidas e grupos ureia. Esta variedade permite múltiplas opções de propriedades para usos específicos. Porém, a presença de solventes orgânicos e de isocianatos apresenta desvantagens relevantes de saúde, higiene e segurança na aplicação e limitações de utilização por aplicadores não profissionais, o que tem resultado na procura de soluções alternativas. As soluções de ligante orgânico em base aquosa, resultam da combinação de resinas em dispersão aquosa de base acrílica ou estireno butadieno, com cargas. Recentemente, o aparecimento e desenvolvimento contínuo de ligantes alternativos em dispersão aquosa tem surgido no mercado com resultados promissores, como o caso das soluções de poliuretanos em dispersão aquosa (PUDs). Estas dispersões são revestimentos e adesivos que usam a água como solvente primário, obtendo-se uma matriz capaz de ser aplicada com trincha e que forma uma película resistente à penetração de água. Embora, neste caso, se obtenham alongamentos superiores a 100% e resistências à tração muito aceitáveis,

também se verificam casos de obra onde a resistência à fissuração se demonstra débil, com a consequente infiltração de água. Ainda assim, os desenvolvimentos recentes neste domínio têm apresentado comportamentos interessantes de desempenho e durabilidade como resposta a estas questões, permitindo a sua utilização em superfícies horizontais como coberturas, terraços e varandas, embora se admita que o seu desempenho depende de vários fatores, nomeadamente do seu comportamento mecânico (avaliado pela própria normalização mencionada) mas também pelas condições de aplicação, respetivas espessuras e tratamento de pontos singulares. [9-13]

Um fator nem sempre realçado é que o desempenho da solução depende fortemente da compatibilidade entre a membrana e o sistema de reforço têxtil que a integra, com impacto ao nível mecânico, físico e químico. Existem várias opções de reforço para sistemas de impermeabilização de membranas líquidas. Por exemplo, redes em fibra de vidro com tratamento alcalino, com aberturas de malha entre 2 e 4 mm. Outro exemplo, o mais comum no caso de coberturas, é a utilização de não tecido produzido a partir de polímeros sintéticos como polipropileno, polietileno, poliéster e poliamida ou ainda fibras naturais como sisal ou coco. As normas europeias para a sua definição e caracterização são em função das várias utilizações possíveis.



Figura 2: Demonstração das consequências de desempenho insuficiente (resultando em fissuração do conjunto) e satisfatório, entre membranas de impermeabilização e estruturas de reforço após 2 anos de serviço (esquerda: rede de fibra de vidro combinada com membrana acrílica; direita: não tecido com membrana em poliuretano de base solvente).

O ETAG 005 (partes 6 e 8) refere apenas três propriedades específicas a considerar, a saber, a massa por unidade de área (ISO 3374:2000 ou ISO 9073-1:1989), a tensão de tração e alongamento (ISO 3342:2011 ou ISO 9073-3:1989). Segundo a mesma norma, as soluções podem ser tecido ou não tecido de material sintético, fibras de vidro ou outro material. Apesar de tudo, é incomum ver estudos detalhados de compatibilidade específica entre a membrana e o reforço aplicado, embora se verifique frequentemente rotura do conjunto atravessando os dois elementos sem ser questionável porque o conjunto falhou ou até onde terá sido um dos elementos a própria causa da rotura do conjunto (figura 2). Na verdade, a garantia de compatibilidade entre dois materiais e, consequentemente, de obtenção de uma situação de maior desempenho do conjunto, depende da sua relação a nível mecânico, físico e químico. No caso da vertente mecânica, é admissível que o melhor resultado advenha da capacidade de constituir uma continuidade entre a membrana e o reforço, que deverá implicar uma penetração otimizada da mesma entre os espaços na estrutura têxtil. Também se pode admitir outra forma, que consiste na aplicação sequencial de camadas em forma de *sandwich* entre a membrana e o têxtil de reforço, admitindo ainda que a membrana conseguirá impregnar o reforço. Esta é uma solução comum no caso de utilização de membranas líquidas em poliuretano de base solvente, mas apresentará limitações no caso de soluções aquosas, por resultar em dificuldades adicionais de secagem da membrana, o que se apresenta como uma incompatibilidade na vertente física. Isto significa que, para estes casos, será necessária alguma abertura mínima na estrutura de reforço que garanta apenas um equilíbrio possível capaz, por um lado, de garantir reforço mecânico otimizado e, por outro, não constituir uma limitação ao processo de secagem e formação de filme, próprio de um sistema aquoso. Por último, a vertente de compatibilidade química não é de menor importância, se for considerado a exposição do elemento

reforço a um ambiente de alcalinidade e da presença de alguns coalescentes orgânicos, típicos destes sistemas aquosos. [15-17]

O presente trabalho centra-se na avaliação experimental da compatibilidade entre uma membrana líquida de base aquosa e várias alternativas de reforço, sobretudo ao nível do resultado de desempenho mecânico resultante da sua combinação.

Metodologia Experimental

De forma a avaliar a compatibilidade entre a membrana PUD desenvolvida no âmbito do projeto PT 2020 “*Smart Roofs System*” e um potencial reforço, adotaram-se ensaios indicados na tabela 1, para avaliar a membrana e o reforço isoladamente e, posteriormente, combinados.

Para todos os ensaios, fez-se preparação de amostras do seguinte modo:

1. Aplicação de 1ª camada da membrana PUD até uma espessura próxima de 1,5 mm de pasta, seguida de aplicação do reforço;
2. Aplicação de 2ª camada de PUD, com espessura próxima de 0,75 mm;
3. Aplicação de 3ª camada de PUD, com espessura próxima de 0,75 mm;
4. No final, após um período de secagem e formação de filme de, pelo menos 21 dias, pretende-se obter uma espessura entre 1,6 e 2 mm.

O ensaio de secagem implica a medição da perda de massa do conjunto, aplicado ao longo do tempo (por norma, a cada hora durante as 1ª e 8ª hora e, posteriormente, à 12ª e 24ª hora). Nos casos onde se pressiona o filme formado, fez-se avaliação de empírica de *pegajosidade* (comumente designada por *tack*) por pressão com o dedo sobre o filme formado e avaliação da capacidade existente da membrana para “colar”.

Tabela 1: Relação de ensaios realizados aos materiais isolados e combinados, ao nível mecânico e da secagem.

Ensaio	Propriedade	Membrana PUD	Reforço	Membrana + Reforço	Norma
Tensão-deformação	Tensão à rotura (MPa)	X			Membrana PUD: ASTM D412-06 ^a e ASTM D624-00 [18,19]
	Alongamento à rotura (%)	X			
Corte/ Resistência ao rasgo	Corte (<i>tear</i>) (N/mm)	X	x	x	Reforço e/ou Reforço + PUD: EN ISO 13937-4 [20]
	Força máxima (N)	X	x	x	
Secagem	Humidade remanescente (%)	X		x	Metodologia interna
	<i>Tack</i> ⁽¹⁾ (h)	X		x	

⁽¹⁾ Referente a medida de *pegajosidade* ao toque

As soluções de reforço das membranas de impermeabilização testadas foram:

- Não tecido 100% poliéster; 110 g/m²; 0,69 mm de espessura;
- Rede de fibra de vidro com tratamento alcalino, 90 g/m², abertura de 3x3 mm²;
- Tecido 100% poliéster reciclado, desenvolvido no âmbito do projeto *Smart Roofs System* referenciado por R22 (v2); massa por unidade de superfície de 155 g/m², construído com fios de teia e trama de massa linear 167/2 dtex, com torção de 300 voltas/ metro. A estrutura foi desenvolvida a partir de um debuxo formando uma rede de abertura de 1,5x1,5 mm², com uma densidade de fios de teia de 19 fios/cm e uma densidade de fios de trama 23 passagens/cm. Este tecido foi submetido a um acabamento de termofixação para estabilização do mesmo. Salienta-se que o processo de termofixação do tecido R22 provocou uma perda da resistência ao rasgo em ambos os sentidos, por isso considerou-se o tecido R22 termofixado como v2.
- Tecido de composição 100% poliéster reciclado, desenvolvido no âmbito do projeto *Smart Roofs System* referenciado por R22 (v3); de massa por unidade de superfície de 238 g/m², construído com fios de teia e trama de massa linear de 167/3 dtex e torção de 500 voltas/m. A

estrutura foi desenvolvida a partir de um debuxo formando uma rede de abertura de 1,5x1,5 mm², com a mesma densidade de fios de teia e trama (19 fios/cm e 19 passagens/cm).

- Tecido 100% polipropileno, desenvolvido no âmbito do projeto *Smart Roofs System* referenciado por R22 (PP); de massa por unidade de superfície de 165 g/m², construído com fios de teia e trama de massa linear 167/2 dtex, com torção de 140 voltas/ metro. A estrutura foi desenvolvida a partir de um debuxo formando uma rede de abertura de 1,5x1,5 mm², com uma densidade de fios de teia de 19 fios/cm e uma densidade de fios de trama 23 passagens/cm.

A tipologia de estrutura desenvolvida (R22), em três abordagens diferentes de construção, apresenta um debuxo com padrão de rede de aproximadamente 1,5 mm, permitindo a transferência ótima da membrana através da estrutura, de modo a promover sua adesão com a estrutura têxtil de reforço e atender aos requisitos de baixa gramagem e espessura, ao mesmo tempo que apresenta alta resistência bidirecional ao rasgo e à rotura.

Para além dos testes anteriormente mencionados, foi ainda efetuada a avaliação da resistência mecânica da estrutura têxtil de reforço, em diferentes condições, nomeadamente, nas amostras originais, e após exposição a condições de imersão em soluções alcalinas (pH 13), proporcionadas por a) uma solução de NaOH (10g de NaOH dispersos em 1 litro de água); b) solução CaO “água de cal” (3,7 g de cal para 1 litro de água); e c) contato direto com uma amino-propanol, tipicamente usada na composição da membrana de PUD como estabilizador de pH (neste caso, ainda não se apresentam resultados de resistência ao rasgo) e também após a aplicação da membrana nas referidas estruturas de reforço têxteis (sistemas compostos por membrana e estrutura de reforço). As estruturas convencionais, como o não tecido e a rede em fibra de vidro, não foram submetidos aos testes de métodos internos de envelhecimento através de imersão em soluções alcalinas.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos e respetiva discussão estão apresentados nas próximas secções. A primeira apresenta um conjunto de resultados relativos à membrana PUD aplicada isoladamente.

Caracterização da membrana PUD. Os resultados obtidos relativos à membrana de impermeabilização de base aquosa (dispersão de poliuretano) são apresentados nas figuras 3, 4 e 5, respetivamente, relativos ao ensaio de tensão-deformação, conforme ASTM D412-06a, ensaio de corte (*Tear Strength*), conforme ASTM D624-00 e avaliação do processo de secagem.

Os resultados relativos ao ensaio mecânico realizado conduzem aos seguintes dados finais:

- Tensão máxima à rotura: 8 N/mm²
- Alongamento à rotura: 485%
- Tensão de corte (*tear strength*): 35 N/mm

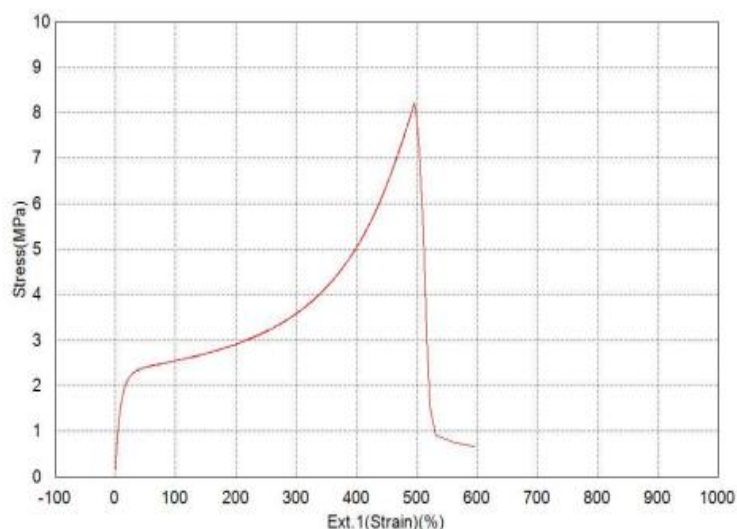


Figura 3: Demonstração Resultados do ensaio de tensão da membrana PUD (curva típica ensaio tensão-deformação), conforme ASTM D412-06a.

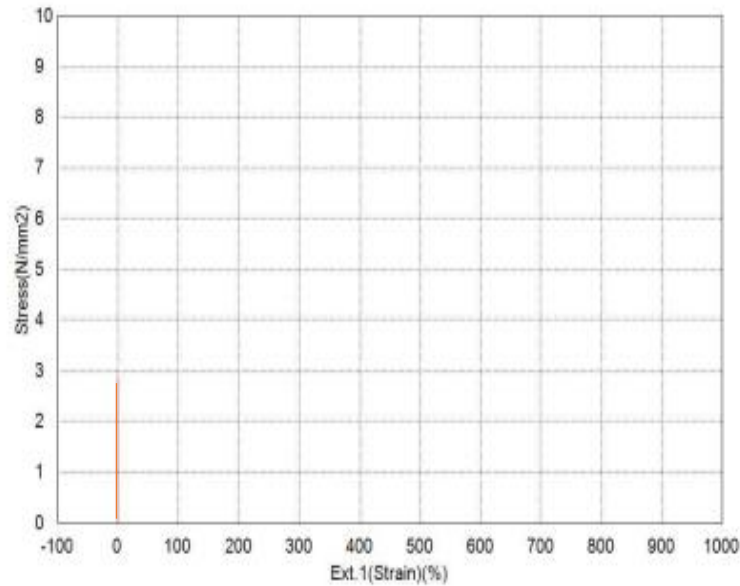


Figura 4: Resultados do ensaio de corte da membrana PUD (curva típica ensaio de corte_ *tear*), conforme ASTM D624-00.

A partir da curva de secagem (figura 5), é possível estabelecer as seguintes relações e dados:

- Absorção de água após 28 dias: 5,8 %
- Tempos de secagem a 22 °C & 55 %Hr, assumindo estabilização quando o valor remanescente de humidade é menor ou igual a 10 %, para um filme de espessura média de 2 mm (tabela 2).
- “*Tack*”, inferior a 2 h (que se observou ser relacionada com uma humidade remanescente inferior a 10 %).

Este ensaio é relevante porque permitirá avaliar se a introdução de reforço condiciona a secagem do conjunto, limitando o processo de aplicação. Embora não se tenham feitos ensaios exaustivos neste domínio, apenas o caso de conjugação com o não tecido evidenciou tempos de secagem (ausência de *Tack*) bastante superiores ao equivalente à membrana isolada, com aproximadamente mais 24 horas para um resultado similar (sobretudo na face inferior da estrutura de reforço).

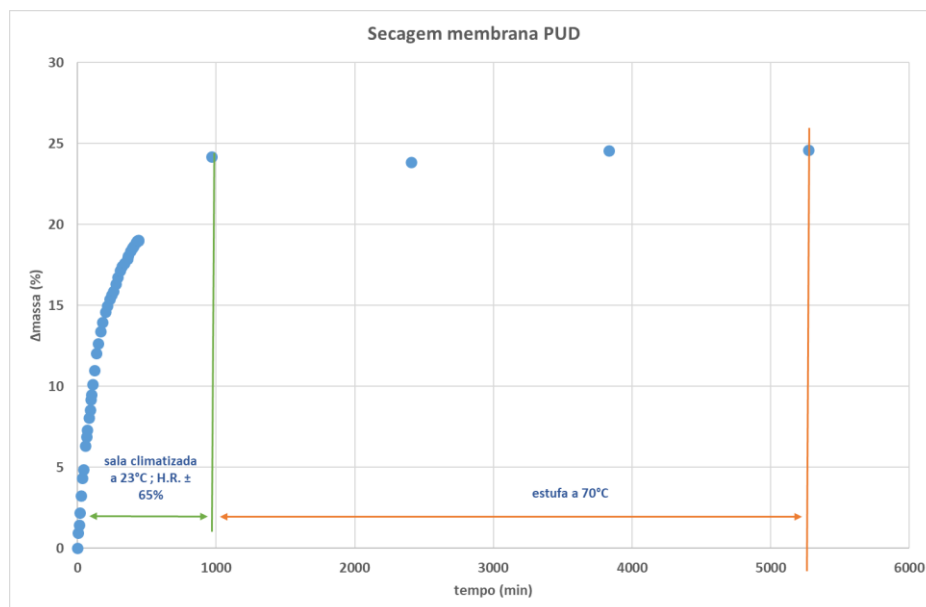


Figura 5: Resultados relativos ao ensaio de avaliação de secagem da PUD à temperatura ambiente e 70°C após 1000 minutos.

Tabela 2: Humidade remanescente em função do tempo de cura a 22 °C e HR de 55 %.

Tempo (h)	% humidade remanescente
2	10
8	5
12	5
24	5

Resultados relativos à estrutura de reforço (isolado e após sujeito a ambientes alcalinos). A estrutura de reforço, com e sem sujeição ao envelhecimento, foi sujeita a ensaios de resistência ao rasgo, segundo a EN ISO 13937-4:2000. Os resultados são apresentados na tabela 3, para o caso do reforço original, e nas tabelas 4 e 5, após sujeição a envelhecimento em água de cal e NaOH, respetivamente.

Tabela 3: Resultados relativos a resistência ao rasgo (força máxima, N), segundo a EN ISO 13937-4:2000, para as diferentes opções de reforço mencionadas (versão original).

Amostra/ Orientação	Não tecido	Rede de fibra de vidro	Tecido R22 (v2)	Tecido R22 (v3)	Tecido R22 (PP)
Teia	72	110	270	560	250
Trama	(1)	130	310	520	330

(1) O rasgo não é completo devido ao rasgo lateral; a baixa resistência do não tecido faz com que rasgos laterais ocorram durante a realização do teste de resistência numa direção específica.

Tabela 4: Resultados relativos a resistência ao rasgo (força máxima, N), segundo a EN ISO 13937-4:2000, para as diferentes opções de reforço mencionadas, após sujeição a envelhecimento em solução de água de cal por 6 dias.

Amostra/ Orientação	Não tecido	Rede de fibra de vidro	Tecido R22 (v2)	Tecido R22 (v3)	Tecido R22 (PP)
Teia	(2)	(2)	230	390	130
Trama	(2)	(2)	200	410	160

(2) Não realizado

Tabela 5: Resultados relativos a resistência ao rasgo (força máxima, N), segundo a EN ISO 13937-4:2000, para as diferentes opções de reforço mencionadas, após sujeição a envelhecimento em solução de NaOH por 6 dias.

Amostra/ Orientação	Não tecido	Rede de fibra de vidro	Tecido R22 (v2)	Tecido R22 (v3)	Tecido R22 (PP)
Teia	(2)	(2)	220	390	130
Trama	(2)	(2)	190	410	160

(2) Não realizado

Resultados relativos à combinação de reforço com a membrana PUD. O conjunto entre a estrutura de reforço e a membrana de base aquosa PUD foi igualmente avaliado relativamente a ensaios de resistência ao rasgo, segundo a EN ISO 13937-4:2000. Os resultados são apresentados na tabela 6.

Tabela 6: Resultados relativos à resistência ao rasgo (força máxima, N), segundo a EN ISO 13937-4:2000, para as diferentes opções de reforço mencionadas, combinadas com a membrana PUD e com período de cura superior a 30 dias.

Amostra/ Orientação	Não tecido	Rede de fibra de vidro	Tecido R22 (v2)	Tecido R22 (v3)	Tecido R22 (PP)
Teia	38	91	88	160	180
Trama	34	65	96	140	140

A figura 6 resume os resultados relativos à resistência ao rasgo para todas as condições indicadas atrás. Os dados permitem verificar uma melhoria considerável de resistência das estruturas desenvolvidas relativamente às soluções convencionais de não tecido e rede de fibra de vidro. Também se verifica que a sua exposição a ambientes alcalinos contribui para um decréscimo da resistência apresentada, embora se admita que estabilize em níveis bastante aceitáveis e ainda acima dos sistemas convencionais não sujeitos a envelhecimento. Verifica-se que os resultados são bastante similares para a teia e trama, relativamente às estruturas desenvolvidas. No caso do não tecido, verificam-se comportamentos distintos e não foi possível obter um dos valores (trama) por deslizamento no material durante o ensaio. A rede de fibra de vidro também tende a apresentar este comportamento por deslizamento durante o ensaio.

Estes resultados sugerem estabilidade elevada do sistema composto pelo reforço e a membrana em ambientes com pH alcalino, sugerindo que o comportamento possa ser bastante satisfatório, mesmo com aplicações sobre suporte de base cimentícia ainda precoces no tempo de cura. De notar, porém, que esta expectativa deverá ser demonstrada por ensaios dedicados para o efeito.

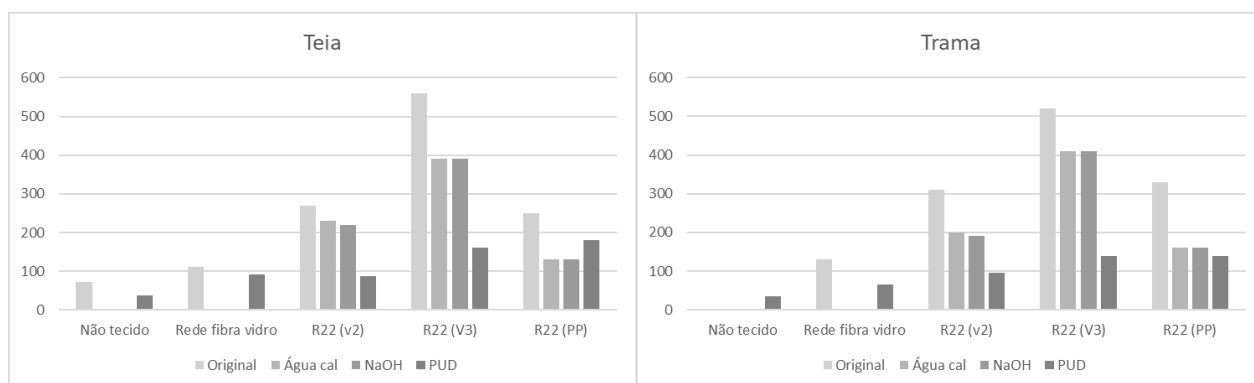


Figura 6: Sumário de resultados relativos à resistência ao rasgo (força máxima, em N) para todas as situações consideradas no presente estudo.

Finalmente, a combinação das estruturas de reforço com a membrana de base aquosa PUD revela um decréscimo significativo no valor da resistência, o que corrobora a relevância de estudo detalhado de compatibilidade a este nível. Ainda assim, a ordem de valores obtidos continua a evidenciar melhoria de desempenho para as estruturas R22 e, especialmente, para a versão R22 (v3). Relativamente às soluções de reforço convencionais, os valores são particularmente baixos para o caso de utilização do não tecido, que levanta questões relacionadas sobre o que será a verdadeira relação entre este comportamento e os ensaios-tipo promovidos pela legislação associada ao sistema (EAD 030350-00-0402) e que definem o desempenho real do sistema.

Ainda sobre a redução dos valores por exposição do reforço à membrana, considera-se que a causa não se relacione tanto com componentes que resultem em maior alcalinidade, mas antes com outras possibilidades como componentes orgânicos, por exemplo. De qualquer forma, seguramente se conclui sobre a necessidade de prosseguir com pesquisa e estudos a este nível.

Conclusões

O trabalho em questão tem como objetivo principal avaliar a compatibilidade entre estruturas de reforço e uma membrana de poliuretano de base aquosa. As estruturas de reforço em estudo compreendem soluções convencionais, como não tecido ou rede em fibra de vidro e alternativas de reforço têxtil especificamente desenhadas com o objetivo de se assegurar um desempenho melhorado.

Esta intenção tem por base a premissa que a durabilidade real deste conjunto, inserido num contexto de uma cobertura convencional ou invertida, depende fortemente da sua compatibilidade mecânica, física e química. Admite-se que as duas primeiras se relacionam, sobretudo, com o debuxo do reforço e a capacidade da membrana se embrenhar no próprio, pelo que os ensaios e exigências referenciadas pela EAD 030350-00-0402 serão representativos da real compatibilidade a estes níveis. Porém, são omissos no que respeita a assegurar a compatibilidade química entre os dois elementos, embora não se conheçam muitos estudos que se dediquem especificamente a esta questão. Assim, apresentam-se um conjunto de ensaios de resistência ao rasgo, relativos aos reforços isolados, após sujeição a ambientes potencialmente degradantes da sua estrutura e combinados com a própria membrana PUD.

Os resultados demonstram efeitos de degradação significativa, especialmente quando em contacto com a PUD, corroborando a expectativa de necessidade de avaliação mais exaustiva neste domínio. Por outro lado, também sugerem que as estruturas desenvolvidas no âmbito do projeto *SRS - Smart Roofs System: Advanced Roofs Waterproofing System*, POCI-01-0247-FEDER-046957, resultam numa adequação e compatibilidade superiores com a membrana, pelo que será expectável que a sua utilização em contexto de cobertura plana resulte num sistema com maior desempenho e

durável.

A sequência deste trabalho implica a realização dos ensaios indicados no referido EAD, esperando-se o cumprimento dos requisitos mais exigentes. Em paralelo, ensaios de envelhecimento adicionais, por exemplo, com solicitação de origem térmica, estão em execução. Considerando a degradação observada na resistência ao rasgo, quando os reforços são sujeitos ao contacto prolongado com a membrana, recomenda-se a realização de mais ensaios com foco em constituintes específicos da composição da membrana, por forma a avaliar com maior exatidão a causa para tal degradação, sabendo que, pelos resultados do presente estudo, compostos que impliquem maior alcalinidade do sistema dificilmente se apresentam como a causa principal para tal.

Finalmente, serão realizados ensaios adicionais que estudem detalhadamente o impacto ao nível da secagem da membrana, quando combinada com a estrutura de reforço, comportamento ao nível da facilidade de aplicação da membrana na presença do reforço e do aspeto estético da combinação resultante, questões igualmente relevantes do desempenho final da solução

Agradecimentos

Trabalho realizado no âmbito do projeto *SRS - Smart Roofs System: Advanced Roofs Waterproofing System*, POCI-01-0247-FEDER-046957, financiado por COMPETE 2020, Portugal 2020, FEDER.

Bibliografia

- [1] Sedlbauer, K.; Schunck, E.; Barthel, R.; Kunzel, H.M., *Flat Roof Construction Manual, Materials Design Applications*, Edition Detail Munich, Basel, 2010.
- [2] Kalibatas, D.; Kovaitis, V., *Selecting the most effective alternative of waterproofing membranes for multifunctional inverted flat roofs*, Journal of Civil Engineering and Management, 23 (2007) 650-660.
- [3] Braun, J.A.; Maranhão, F.L.; Monte, R., *Behavior of Waterproofing Systems Exposed to Environmental Agents*, XV International Conference on Durability of Building Materials and Components, DBMC 2020, Barcelona.
- [4] De Silva, N. and Ranasinghe, M., *Maintainability of reinforced concrete flat roofs in Sri Lanka*, Structural Survey, 28(4) (2010) 314-329.
- [5] Akbari, H. and Levinson, R., *Evolution of Cool-Roof Standards in the US*, Advances in Building Energy Research, 2(1) (2008) 1-32.
- [6] Espinosa-Fernández, A., Echarri-Iribarren, V. and Sáez, C., *Water-Covered Roof Versus Inverted Flat Roof on the Mediterranean Coast: A Comparative Study of Thermal and Energy Behavior*, Applied Sciences, 10(7) (2020) 2288.
- [7] Kubal, M., *Construction waterproofing handbook*, McGraw-Hill Education (2008).
- [8] ETAG 005, EAD 030350-00-0402- Liquid Applied Roof Waterproofing Kits (parts 1 to 8), (2020).
- [9] Bastos, L., *Análise comparativa de sistemas de impermeabilização*, Doctoral dissertation, Universidade de Coimbra (2014).
- [11] Supradip Das, *Developments in polymer as waterproofing material*, Civ. Eng. Constr. Rev. (2005).
- [12] Kalibatas, D. Kovaitis, V., *Selecting the most effective alternative of waterproofing membranes for multifunctional inverted flat roofs*, Journal of Civil Engineering and Management, 23, Issue 5 (2017).

- [13] Feiteira, J.; J. Grandão Lopes, J., de Brito, J. *Mechanical Performance of Liquid-Applied Roof Waterproofing Systems*, Journal of Performance of Constructed Facilities, 27, Issue 3 (2013).
- [14] Tsukagoshi, M., Miyauchi, H, Tanaka K., *Protective performance of polyurethane waterproofing membrane against carbonation in cracked areas of mortar substrat*, Construction and Building Materials, 36 (2012) 895-905.
- [15] Russell, S.J., *Handbook of Nonwovens*, CRC; Woodhead publishing limited, Boca Raton (2007).
- [16] Shao, Xu-Dong ; Song, Je-Young ; Kim, Young-Suk ; Oh, Sang-Keun, *An Experimental Study on the Complex Waterproofing Method of Exposure using PE Textiles of Mesh type and Highly Viscous Urethane*, Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference.
- [17] Berdahl, P., Akbari, H., Levinson, R. and Miller, W., *Weathering of roofing materials – An overview*, Construction and Building Materials, 22(4) (2008) 423-433.
- [18] ASTM D412-06a, Standard test methods for Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers-Tension. ASTM, (2009).
- [19] ASTM D624-00, Standard Test Method for Tear Strength of Conventional Vulcanized Rubber and Thermoplastic Elastomers, ASTM, (2001).
- [20] EN ISO 13937-4, Textiles — Tear properties of fabrics — Part 4: Determination of tear force of tongue-shaped test specimens (Double tear test), (2000).

Estudo Comparativo de Desempenho Mecânico de Argamassas com Diferentes Tipos de Ligantes

BRANCO Fernando G.^{1a}, ORTEGA José Marcos^{2b}, MARQUES Luís^{1c} e PEREIRA Luís^d

¹ ISISE – Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia, Universidade de Coimbra – Departamento de Engenharia Civil, Rua Luís Reis Santos – Pólo II – 3030-788 Coimbra, Portugal

² Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Alicante, Ap. Correos 99, Alacant/Alicante 03080, Spain

^afjbranco@dec.uc.pt, ^bjm.ortega@ua.es, ^cluis_marques911@hotmail.com, ^dlfmpereira@uc.pt

Palavras-chave: argamassas; cimento; aproveitamento de resíduos; ligantes alternativos; baixo teor de clínquer.

Resumo. A indústria da Construção enfrenta atualmente grandes desafios, no sentido de procurar se adaptar à preocupação crescente com problemas relacionados com conceitos de sustentabilidade e redução do impacto no aquecimento global. A produção de cimento Portland encontra-se associada à produção de elevadas quantidades de CO₂, um produto que tem vindo a ser responsabilizado pelo aquecimento generalizado da temperatura do Planeta. No sentido de procurar minimizar o impacto deste constituinte do betão, tem vindo a ser realizada investigação no sentido de reduzir a quantidade de clínquer Portland presente no betão. A redução do teor de clínquer no betão pode ser obtida através da sua substituição total ou parcial por materiais alternativos com propriedades pozolânicas. Esta substituição permite ainda contribuir para a sustentabilidade na Construção, tendo em conta que o produto substituído é geralmente um resíduo industrial, permitindo implementar o conceito de economia circular, com a redução de desperdícios, da quantidade de recursos naturais e matérias-primas utilizadas. A presente comunicação analisa e compara o desempenho mecânico de argamassas em que se utilizam diferentes resíduos industriais, de modo a aferir a sua influência no desempenho mecânico. Estuda-se o desempenho de argamassas produzidas com incorporação de cinzas volantes de biomassa, escória de fundo de forno de biomassa, e cinzas de casca de arroz.

Introdução

A preocupação sobre as alterações climáticas é uma prioridade de qualquer sector económico mundial, sendo a indústria da construção um dos sectores que mais liberta emissões de CO₂. Com o objetivo de tornar este sector mais sustentável e ecológico, tem vindo a ser realizada investigação no sentido de promover a utilização de resíduos industriais com propriedades pozolânicas, permitindo a substituição total ou parcial de cimento [1][2].

Com o aumento acentuado do gás natural e da energia elétrica, as cinzas de biomassa e as cinzas de cascas de arroz, surgem com uma potencial alternativa mais sustentável para a substituição no cimento. A utilização destas adições permite melhorar o desempenho das argamassas em termos ambientais, tendo influência no seu desempenho mecânico [3]. Estima-se que a substituição de 18% de Cimento Portland por adições resultaria numa redução de 17% das emissões de CO₂ mundiais [4].

Estima-se que a combustão de biomassa em centrais termoelétricas com base em resíduos agrícolas e florestais produza em média 14% da oferta mundial, prevendo-se até 2050 o aumento de 25 a 46% de aumento na combustão de biomassa para produção de energia elétrica [5].

A quantidade e qualidade das cinzas produzidas numa central de biomassa, são fortemente influenciadas pela temperatura e tipos de resíduos orgânicos utilizados [6]. Neste sentido, podem identificar-se dois tipos de cinzas: as cinzas de fundo do forno, produzidas a temperaturas de 700°C

e as cinzas volantes, cuja temperatura atinge os 1000-1200°C. O tipo de resíduo utilizado na produção destas cinzas consiste essencialmente em resíduos de floresta. Na atualidade, a maior parte das cinzas de biomassa produzidas em centrais termoelétricas são descartadas para aterros ou recicladas apenas para fins agrícolas [7].

As cinzas de biomassa possuem um teor alcalino superior ao das cinzas volantes de carvão, sendo que a sua utilização pode ser uma solução para a diminuição de compostos alcalinos em betões com elevado volume de adições. A utilização destas adições permite assim contribuir para minimizar os problemas relacionados com a diminuição de pH e da corrosão das armaduras nas estruturas de betão [8].

Sendo o arroz a base alimentar de mais de metade da população mundial, e tendo em conta que as suas cascas constituem um resíduo que corresponde a cerca de um quinto do arroz produzido [9], este é também um resíduo potencialmente interessante como substituto do cimento. As suas propriedades físicas e químicas incluem uma baixa densidade, um carácter abrasivo, um valor nutritivo reduzido e um elevado teor em sílica, o que lhe confere ótimas características com adição para incorporação em argamassas de cimento [10].

A presente comunicação apresenta resultados experimentais obtidos em ensaios realizados sobre argamassas contendo incorporação de cinzas como substituto parcial do cimento Portland. Estudaram-se argamassas contendo cinzas de biomassa (cinzas volantes e de fundo de forno) provenientes de uma central termoelétrica e cinzas de cascas de arroz.

O presente trabalho tem como objetivo contribuir para o conhecimento do comportamento de argamassas produzidas com diferentes tipos de ligantes e avaliar o seu desempenho físico e mecânico. Produziram-se argamassas com substituição parcial de cimento por um resíduo alternativo. Foram estudadas três formulações com ligantes diferentes, produzidos com base em cimento Portland, e com substituição de cinza de fundo de forno de biomassa, cinzas volantes de biomassa e cinzas de cascas de arroz. As argamassas foram caracterizadas em termos de comportamento mecânico, tendo sido os resultados obtidos comparados com uma argamassa de referência (sem cinzas). Testaram-se nove formulações com diferentes percentagens de ligante. Após 28 dias de cura em ambiente saturado (HR \pm 100% e temperatura 20°C), as misturas foram submetidas a ensaios mecânicos, nomeadamente ensaios de flexão e compressão. Foram ainda determinadas as velocidades de propagação de ultrassons e o módulo de elasticidade dinâmico.

Metodologia

O presente estudo pretende avaliar o desempenho de argamassas de cimento, em que o agregado é parcialmente substituído por diferentes adições.

Tomou-se como referência uma argamassa (AGREF) composta por Cimento Portland Normal (CEM I), com uma resistência característica de 42,5 [MPa], e produzida com um traço em peso 1:3 (cimento e areia), e uma razão água/cimento de 0,5. O desempenho desta mistura de referência foi comparado com as séries produzidas com em que a areia foi parcialmente substituída por diferentes adições. Para estas séries, foram substituídas três diferentes percentagens de massa de areia por adições alternativas (10, 15 e 20%), tendo sido analisadas três tipos de adição para cada uma das substituições: Cinzas de escória de fundo de forno de biomassa (B/ESC), cinzas de cascas de arroz (CCA) e cinzas volantes de biomassa (B/VOL). Todos os agregados se encontravam secos, no momento da amassadura. A Tabela 1 apresenta as formulações das misturas testadas.

As adições testadas foram caracterizadas previamente, tendo sido determinada a sua massa volúmica com base na norma NP EN 1097-7. Os valores obtidos para as densidades para os ligantes B/ESC, CCA e B/VOL foram 2.542, 1.523 e 2.184 g/cm³ respetivamente. A Figura 1, ilustra os instrumentos utilizados na determinação das massas volúmicas.

Tabela 1: Designação dos provetes utilizados nas amassaduras.

Provetes	Substituição (%)	Cimento (g)	Areia (g)	Adição (g)	Água (ml)
AGREF	0%	1642,50	4927,50	492,75	821,25
B/ESC10	10%	1642,50	4434,72	492,75	821,25
CCA10	10%	1642,50	4434,72	492,75	821,25
B/VOL10	10%	1642,50	4434,72	492,75	821,25
B/ESC15	15%	1642,50	4188,38	739,13	821,25
CCA15	15%	1642,50	4188,38	739,13	821,25
B/VOL15	15%	1642,50	4188,38	739,13	821,25
B/ESC20	20%	1642,50	3942,00	985,50	821,25
CCA20	20%	1642,50	3942,00	985,50	821,25
B/VOL20	20%	1642,50	3942,00	985,50	821,25



Figura 1: Determinação das massas volúmicas, da Cinza Volante de Biomassa, Cinza de Fundo de Biomassa e Cinza de Cascas de arroz.

Para cada série, produziram-se seis provetes com dimensões de 160x40x40mm, destinados à caracterização mecânica e à realização de ensaios de absorção de água. Após a desmoldagem os provetes foram mantidos numa câmara climática à temperatura controlada de $(20 \pm 2^\circ\text{C})$ até à data dos ensaios. A Figura 2 ilustra a execução das amassaduras e a posterior desmoldagem dos provetes.



Figura 2: Amassadura das séries e desmoldagem dos provetes.

Os ensaios de resistência mecânica (ensaio de compressão e de flexão), foram elaborados de acordo com as indicações da norma EN 1015-11 (1999). No ensaio de flexão, os provetes foram colocados numa prensa, e aplicada uma carga constante até à rotura. A resistência à flexão final de cada amostra foi calculada através da equação 1.

$$R_f = 1.5 \times \frac{F \times l}{b \times d^2} \quad (1)$$

Onde, R_f é a resistência à flexão [N], F é a força máxima aplicada no ensaio aquando da rotura do provete [N], b é o comprimento da secção do provete [mm] e d a altura da secção do provete [mm]. O processo foi repetido para todas as restantes amostras.

O ensaio de resistência à compressão foi realizado recorrendo às metades dos provetes que haviam sido sujeitos anteriormente ao ensaio de resistência à flexão e com base na norma EN 1015-11. A carga foi aplicada na superfície de 1600 mm^2 , sendo o resultado obtido através da aplicação da equação 2.

$$R_c = \frac{F}{A}. \quad (2)$$

Onde, R_c é o valor final da resistência à compressão [N/mm^2], F é a força máxima de rotura à compressão [N] e A é a área de aplicação da carga [mm^2]. O procedimento foi repetido para todas as séries do ensaio.

Realizou-se também um ensaio de medição de velocidade de propagação de ultrassons, que consiste na determinação da velocidade de propagação através de um impulso ultrassónico, entre dois pontos. O resultado deste ensaio é relacionável com as características mecânica do material, fornecendo ainda indicações acerca da homogeneidade e eventual presença de fendas ou defeitos. Este ensaio foi elaborado de forma direta, sendo efetuado através da colocação de transdutores nos topos do provete, sendo posteriormente efetuada a medição. Para o resultado do ensaio, considera-se a média das três leituras efetuadas. A determinação da velocidade de propagação de ultrassons é efetuada para todos os provetes. A Figura 3 ilustra o equipamento utilizado no ensaio de determinação da velocidade de ultrassons.



Figura 3: Determinação da velocidade de propagação de ultrassons (método direto).

Realizou-se ainda a determinação do módulo de elasticidade longitudinal, com base na norma ASTM C215. Para esse efeito, foi registada previamente a massa de cada provete a ensaiar, bem como as suas dimensões (comprimento, largura e altura).

Resultados

A Figura 4 apresenta os resultados obtidos nos ensaios de compressão simples efetuados nas amostras

Os resultados dos ensaios realizados revelam que a introdução de cinza de casca de arroz conduziu a uma redução significativa da resistência, sendo esta redução tanto maior quanto maior a percentagem de cinzas adicionada. Os resultados obtidos para as séries contendo cinzas volantes (B/VOL) apresentaram a mesma tendência, embora a redução de resistência não seja tão acentuada. A presença de 10% de cinzas conduziu a uma resistência 4.3% inferior à da série de referência. O aumento do teor de cinzas levou a perdas mais significativas de resistência. A utilização de escórias de fundo de forno (séries B/ESC) apresentou uma tendência contrária. O aumento da presença deste tipo de adição conduziu a um aumento da resistência. Para uma percentagem de 10%, a resistência é ligeiramente inferior à registada na série de referência. Para percentagens de 15 e 20%, verificaram-se resistências aumentos de 14,8% e 21%, respectivamente, em relação à série de referência.

No que respeita à resistência à flexão, os resultados obtidos podem ser consultados na Figura 5. O desempenho mecânico à flexão apresenta uma tendência semelhante ao observado nos testes de compressão. Verifica-se que a utilização de escória de fundo de forno (B/ESC) mantém um desempenho semelhante ao da série de referência até os 15%, e apresenta uma ligeira redução quando se aumenta para 20%. As restantes adições evidenciam uma redução de resistência significativa com para teores de 10%, diminuindo o desempenho com o incremento de adição.

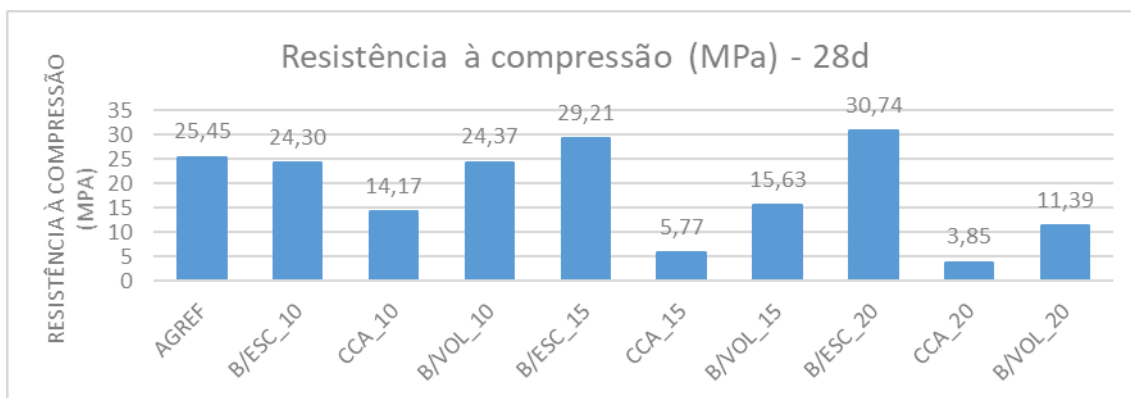


Figura 4: Ilustração do gráfico de resistência à compressão para 28d.

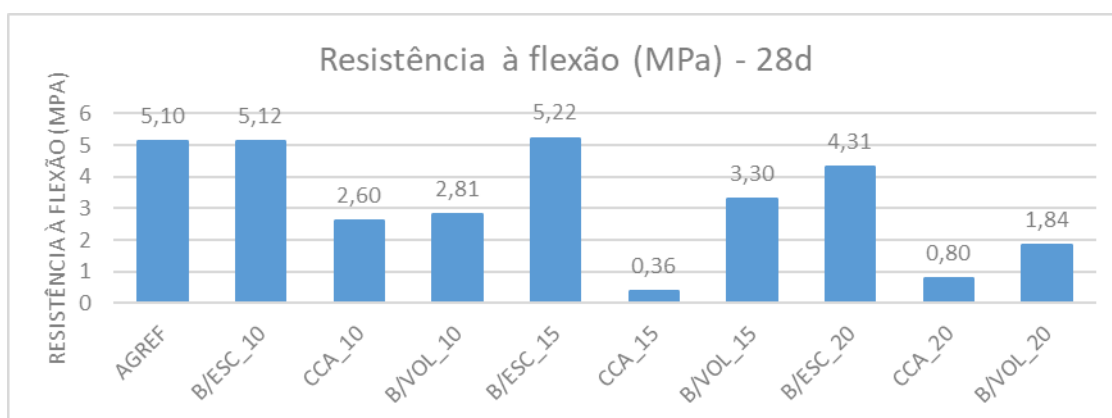


Figura 5: Ilustração do gráfico de resistência à flexão para 28d.

O resultado obtido no ensaio de velocidade de propagação de ultrassons (ver Figura 6) permite verificar que este parâmetro apresenta uma tendência semelhante aos resultados obtidos para a resistência à compressão. De facto, as maiores velocidades de propagação ocorrem na série de referência e na série B/ESC_20, que foram também as que evidenciaram maior resistência mecânica. As séries contendo B/ESC apresentam valores de velocidade de propagação entre 3708 m/s e 4035 m/s. As séries com cinzas B/VOL apresentam velocidades que variam entre 3774 m/s e 2996 m/s, diminuindo com o aumento do teor de cinzas. Já as séries contendo cinzas de casca de arroz (CCA), apresentam velocidades substancialmente menores, diminuindo de 2314 m/s a 1901 m/s com o aumento de teor de adição.

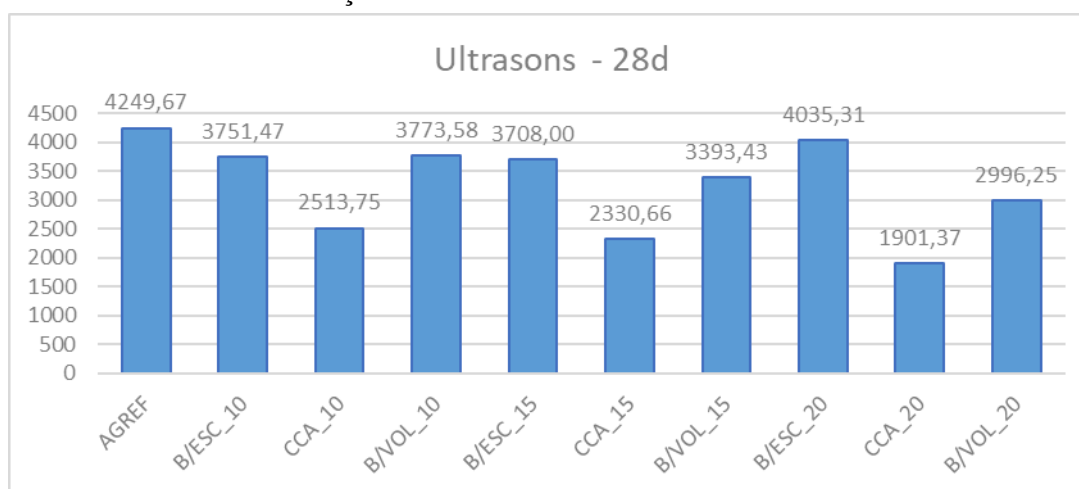


Figura 6: Resultados do ensaio de ultrassons para 28 dias.

Os resultados obtidos na quantificação do módulo de elasticidade encontram-se expressos na Tabela 2 e na Figura 7. Apresenta-se igualmente a massa volúmica aparente das diferentes séries. Pode verificar-se que a massa volúmica da série B/ESC se mantém semelhante à da série de referência. A série B/VOL mantém a mesma tendência até ao teor de 15%, mas um teor de 20% já

evidencia uma redução assinalável de massa volúmica. As séries CCA evidenciam massas volúmicas mais reduzidas, abaixo de 1,8 g/cm³. Com o aumento de teor de adição, a massa volúmica tende a diminuir, para todas as adições.

O valor de módulo de elasticidade dinâmico para a série de referência é de 11.87GPa. As séries contendo 10% de adições apresentaram valores que rondam os 10±0.7GPa, sendo da mesma ordem de grandeza para todas as adições. As séries com teor de 15% de adições apresentam valores de módulo de elasticidade ligeiramente menores (7-8GPa). Regista-se um valor de 19.3GPa para a série B/ESC15, que representa muito provavelmente um valor aberrante, pois é totalmente diferente dos obtidos para todas as outras séries, sem que exista uma razão que possa explicá-lo. Para as séries com teor de 20%, obtiveram-se valores de 11.5±0.4 MPa, portanto próximos do registado para a série de referência, para as séries contendo B/ESC e B/VOL. A série contendo casca de arroz apresentou um módulo de 7,1GPa, semelhante o observado para o teor de 15%.

Tabela 2: Resultados do ensaio de módulo de elasticidade.

Provetes	Massa volúmica (g/cm ³)	E longitudinal (GPa)
AGREF	2,139	11,87
B/ESC10	2,250	10,72
CCA10	1,768	9,65
B/VOL10	2,108	9,98
B/ESC15	2,158	19,31
CCA15	1,695	7,02
B/VOL15	2,054	8,30
B/ESC20	2,229	11,37
CCA20	1,442	7,09
B/VOL20	1,830	11,86

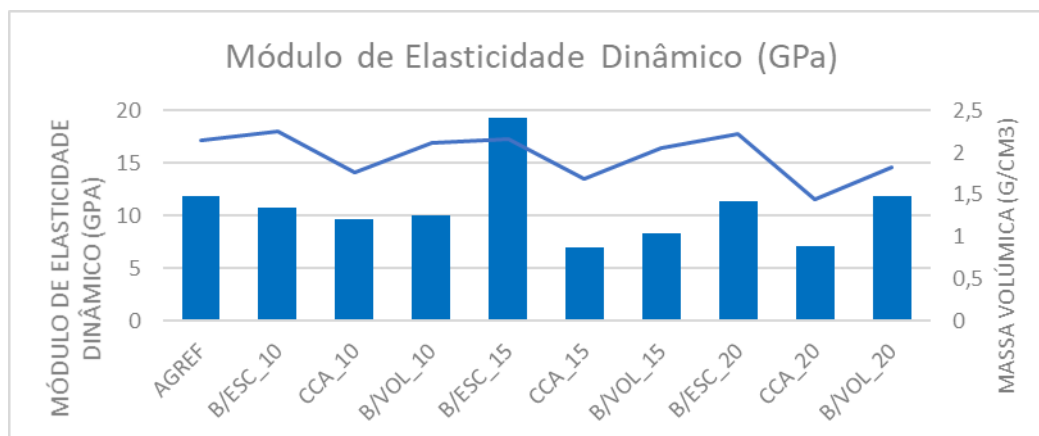


Figura 7: Resultados do ensaio de módulo de elasticidade.

Considerações finais

No presente trabalho foram estudadas argamassas produzidas com diferentes tipos de adições, utilizadas para substituição parcial do agregado, mantendo constante o traço em peso 1:3, e uma razão água-ligante (w/c) de 0,5.

Foram realizados ensaios que permitem caracterizar o desempenho mecânico, tendo sido quantificados parâmetros como: resistência mecânica (flexão e compressão), velocidade de propagação de ultrassons, módulo de elasticidade dinâmico.

O estudo realizado permitiu verificar que o tipo de adição utilizado influenciou significativamente o desempenho mecânico das argamassas, nos diferentes parâmetros avaliados.

A adição de B/ESC permitiu obter argamassas com resistência equivalente, e mesmo superior à da série de referência. A velocidade de propagação de ultrassons em argamassas com esta adição manteve valores semelhantes aos da série de referência. Comportamento semelhante foi observado para o módulo de elasticidade.

A adição B/VOL mostrou-se competente até percentagens de substituição de 10%, apresentando reduções significativas de desempenho para teores superiores.

A adição de CCA não evidenciou qualquer vantagem em termos mecânicos. Todos os parâmetros avaliados apresentaram desempenhos inadequados, independentemente do teor de CCA presente na mistura.

Referências

- [1] E. R. Teixeira, A. Camões, F. G. Branco, and J. C. Matos, *Effect of biomass fly ash on fresh and hardened properties of high volume fly ash mortars*, Crystals (Basel), 11, no. 3 (2021) 1–21, doi: 10.3390/cryst11030233.
- [2] R. Barbosa, N. Lapa, D. Dias, and B. Mendes, *Concretes containing biomass ashes: Mechanical, chemical, and ecotoxic performances*, Constr Build Mater, 48 (2013) 457–463, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2013.07.031.
- [3] F. Agrela, M. Cabrera, M. M. Morales, M. Zamorano, and M. Alshaaer, *Biomass fly ash and biomass bottom ash*, in *New Trends in Eco-efficient and Recycled Concrete*, Elsevier, (2018) 23–58. doi: 10.1016/B978-0-08-102480-5.00002-6.
- [4] S. Demis, J. G. Tapali, and V. G. Papadakis, *An investigation of the effectiveness of the utilization of biomass ashes as pozzolanic materials*, Constr Build Mater, 68 (2014) 291–300, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.071.
- [5] M. Cabrera, J. L. Díaz-lópez, F. Agrela, and J. Rosales, *Eco-efficient cement-based materials using biomass bottom ash: A review*, Applied Sciences (Switzerland), 10, no. 22. MDPI AG, (2020) 1–23. doi: 10.3390/app10228026.
- [6] R. Rajamma, R. J. Ball, L. A. C. Tarelho, G. C. Allen, J. A. Labrincha, and V. M. Ferreira, *Characterisation and use of biomass fly ash in cement-based materials*, J Hazard Mater, 172, no. 2–3 (2009) 1049–1060, doi: 10.1016/j.jhazmat.2009.07.109.
- [7] S. Rafael et al., *Impact of forest biomass residues to the energy supply chain on regional air quality*, Science of the Total Environment, 505 (2015) 640–648, doi: 10.1016/j.scitotenv.2014.10.049.
- [8] E. R. Teixeira, D. Cunha, A. Camões, F. G. Branco, *Estudo de Betões Eco-Eficientes Através da Utilização de Cinzas Volantes de Biomassa*, 3º Congresso luso-brasileiro materiais de Construção Sustentáveis. <https://www.researchgate.net/publication/323394817>.
- [9] Marques, L., *Caracterização e Avaliação de Durabilidade em Betões com Baixos Teores de Clínquer*, Dissertação de Projeto de Tese Doutorado Engenharia Civil, Universidade De Coimbra (2021).
- [10] Sousa, S., *Betões Eco-Eficientes com Cinzas de Casca de Arroz*, Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto (2005).

Estudo experimental preliminar sobre a durabilidade em ambientes higrotérmicos de bio-laminados pultrudidos de resina de poliéster insaturado bio-derivada e fibras de carbono

SANTOS Marina^{1,a}, LOPEZ Ana^{1,b}, GARRIDO Mário^{1,c},
CORREIA João R.^{1,d} e BORDADO João^{3,e}

¹ CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal

² CERENA, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Portugal

^a marina.leal.santos@tecnico.ulisboa.pt, ^b carolinamendeslopez@tecnico.ulisboa.pt,

^c mario.garrido@tecnico.ulisboa.pt, ^d joao.ramoa.correia@tecnico.ulisboa.pt,

^e jcbordado@tecnico.ulisboa.pt

Palavras-chave: Reabilitação, laminados de CFRP, bio-resina de poliéster insaturado, durabilidade, envelhecimento higrotérmico.

Resumo. Os materiais compósitos de polímero reforçado com fibras (FRP) têm tido um número crescente de aplicações na indústria da construção, sendo particularmente utilizados no reforço de estruturas. Dentre esses materiais, destacam-se os laminados de polímero reforçado com fibras de carbono (CFRP), por apresentarem elevada resistência, leveza e facilidade de aplicação. Face à necessidade crescente de garantir a sustentabilidade dos materiais de construção, aliada à instabilidade da cadeia de fornecimento do petróleo e ao consequente aumento dos preços daquele recurso, têm sido desenvolvidos esforços para fabricar compósitos a partir de matérias-primas renováveis. Contudo, a durabilidade destes novos biocompósitos ainda se encontra por estudar, nomeadamente em comparação com CFRP convencionais. Neste artigo, apresentam-se os resultados iniciais de um estudo de envelhecimento acelerado de laminados de CFRP de dois tipos: (i) convencionais, produzidos com resina de epóxi-vinil éster, e (ii) produzidos com uma resina de poliéster insaturado parcialmente bio-derivada sintetizada a partir de monómeros de origem renovável. Provetes destes dois tipos de laminados foram sujeitos a envelhecimento acelerado, por imersão em água a 20 °C, 35 °C e 50 °C, durante períodos de 1, 3 e 6 meses. Posteriormente, foram realizados ensaios de tração, corte interlaminar e análise dinâmica-mecânica (DMA). Os resultados obtidos permitiram efetuar uma análise comparativa preliminar sobre o desempenho de ambos os tipos de laminados de CFRP no que se refere à sua durabilidade em ambientes higrotérmicos.

Introdução

O desenvolvimento da indústria da construção está também relacionado com a melhoria da sustentabilidade do setor, o que torna necessário, entre outros aspectos, a procura por soluções alternativas que incorporem matérias-primas provenientes de fontes renováveis [1,2]. Os polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) atendem a algumas das necessidades da indústria da construção quanto ao uso mais eficiente dos materiais. De facto, em obras de reabilitação de edifícios e pontes, os laminados de CFRP apresentam diversas vantagens face às soluções =convencionais alternativas convencionais, devido à sua elevada resistência mecânica, não corrosibilidade e reduzida densidade, que também permite rapidez e facilidade de aplicação. Os laminados de CFRP são constituídos por fibras de carbono (com teor volumétrico tipicamente de 60% a 70%) e a sua matriz polimérica inclui geralmente resinas de viniléster e/ou epóxi. Neste contexto, existe uma oportunidade para melhorar a sustentabilidade dos laminados de CFRP utilizando resinas obtidas a partir de matérias-primas renováveis, as chamadas bio-resinas. Para esse

efeito, é importante que os laminados de CFRP produzidos com resinas bio-derivadas apresentem um desempenho semelhante ao que é obtido com recurso a resinas poliméricas convencionais [3].

Recentemente, foi desenvolvida, no Instituto Superior Técnico [4], uma bio-resina de poliéster insaturado para aplicação em materiais compósitos de polímero reforçado com fibras (FRP). No âmbito do projeto BioLam, essa resina foi utilizada com sucesso no fabrico, por pultrusão, de laminados de CFRP, em substituição de uma resina de epóxi-viniléster. Os ensaios de caracterização das propriedades mecânicas e termomecânicas dos bio-laminados de CFRP produzidos mostraram o seu elevado potencial, tendo-se obtido um desempenho muito semelhante ao dos laminados convencionais. Contudo, para além das características a curto prazo, é igualmente importante avaliar o desempenho a longo prazo dos bio-laminados, nomeadamente quando estes são sujeitos a diferentes agentes ambientais, como a humidade, a temperatura e a radiação UV; esses estudos visam definir o seu campo de aplicação e, se necessário, introduzir melhorias nos materiais constituintes.

Na literatura técnica, é possível encontrar estudos com metodologias de envelhecimento acelerado para materiais compósitos de origem petrolífera, que permitem avaliar a retenção das suas propriedades em condições severas, como ciclos de gelo e degelo, exposição à radiação ultravioleta, elevados teores de humidade e imersão permanente em água, sendo esta última situação geralmente a mais crítica para a durabilidade de compósitos de FRP [5–8]. O principal efeito da absorção de água ocorre na resina, por fenómenos tais como a hidrólise ou a plasticização; contudo, da exposição higrotérmica pode igualmente resultar pós-cura do material. Assim, embora a exposição à água resulte geralmente numa diminuição das propriedades mecânicas, dependendo do tempo de exposição e da temperatura, também podem ocorrer efeitos de pós-cura que competem com a degradação.

Nos compósitos de CFRP, embora as fibras de carbono sejam relativamente inertes à influência de soluções aquosas, a ligação entre as fibras e a resina pode ser deteriorada através de uma exposição contínua à humidade. A hidrólise é um mecanismo de degradação irreversível que ocorre através da separação da ligação molecular hidrofílica da matriz polimérica, formando-se fragmentos solúveis em água. Já a plasticização é reversível (por secagem do material), pois resulta do aumento da mobilidade molecular causada pela presença de água entre as cadeias poliméricas da resina. Salienta-se o facto de que, nos compósitos de FRP, as fibras têm uma influência relevante na difusão de humidade no material, sendo esta significativamente menor em comparação com a das resinas puras. Também os mecanismos de degradação causados pela água variam em função do tipo, disposição e arquitetura das fibras [5,9].

Apesar do crescente interesse por bio-resinas e bio-compósitos, devido ao seu potencial para reduzir a pegada de carbono em relação aos polímeros e compósitos convencionais, existem poucos estudos sobre os mecanismos de degradação dos bio-polímeros e dos bio-compósitos com eles produzidos [10,11]. Esta lacuna no conhecimento é relevante, já que a maior parte das estruturas de engenharia civil são projetadas para uma vida útil que muitas vezes excede 50 anos. Uma das abordagens possíveis consiste em realizar ensaios de envelhecimento acelerado a materiais CFRP, com resinas derivadas do petróleo ou bio-derivadas, e extrapolar os dados obtidos para durações de exposição superiores [5,12].

Este artigo apresenta um estudo desenvolvido com o objetivo de avaliar os efeitos do envelhecimento higrotérmico nas propriedades mecânicas e termomecânicas de um laminado com matriz polimérica de poliéster insaturado de origem parcialmente renovável (LBUP) [13] e de um laminado com matriz de resina convencional em epóxi-viniléster (LCVE), ambos produzidos por pultrusão, para utilização em reforço estrutural. Estes laminados foram sujeitos a imersão em água a temperaturas controladas de 20 °C, 35 °C e 50 °C. Após períodos de envelhecimento de 1, 3 e 6 meses, foram realizados ensaios de tração, corte interlaminar e DMA em provetes de ambos os tipos de laminados, nos estados húmido e seco, com o objetivo de avaliar e quantificar os efeitos dos mecanismos de degradação irreversíveis e reversíveis que, no caso da matriz polimérica, estão maioritariamente associados à hidrólise e à plasticização, respetivamente.

Materiais e métodos

Materiais. Neste estudo, foram utilizadas duas resinas para impregnação de fibras de carbono no processo de pultrusão de laminados compósitos de CFRP, produzido para fins de reforço de estruturas de engenharia civil: (i) uma resina termoendurecível de poliéster isoftálico insaturado parcialmente bio-derivada (BUP); e (ii) uma resina convencional de epóxi-viniléster (CVE) [13].

Foram utilizadas fibras de carbono *Tenax®-E STS40 F13 – Teijin*, com 24.000 filamentos de 7 µm de diâmetro e densidade linear nominal de 1600 tex, resistência à tração de 4300 MPa, módulo de elasticidade de 240 GPa, tensão na rotura de 1,8% e densidade de 1,78 g.cm⁻³.

Metodologia. Os ensaios de tração foram realizados segundo as normas ASTM D638 e ASTM D7565/D7565M, em provetes com dimensões de 250 × 20 × 1,36 mm³, a uma velocidade de 2 mm.min⁻¹. Os ensaios de corte interlaminar foram efetuados segundo a norma EN ISO 14130, em provetes com dimensões de 250 × 20 × 1,36 mm³, a velocidade de 1 mm.min⁻¹. Para cada tipo de ensaio e condição de envelhecimento (período e temperatura de imersão e estado de humidade – húmido e seco), foram preparados cinco provetes para cada tipo de laminado, que foram testados em condições laboratoriais, à temperatura ambiente, numa máquina de ensaios universal eletromecânica *Instron 5982*, com capacidade de 100 kN. No ensaio de tração, as deformações dos provetes foram medidas com recurso a um vídeo-extensómetro (câmara *SONY XCG-5005E* com lente *Fujinon - Fujifilm HF50SA-1*).

Foram realizados ensaios de DMA para obter as propriedades termomecânicas dos compósitos. Foi utilizado um aparelho da *TA Instruments*, modelo DMA Q800, e os ensaios foram realizados segundo a norma ASTM E1640. Os provetes, com 60 × 10 × 1,36 mm³, foram testados numa configuração de duplo encastramento com 35 mm de vão, com uma amplitude de deformação de 15 µm, uma frequência de oscilação constante de 1 Hz e variação de temperatura entre -30 e 200 °C a uma taxa de aquecimento constante de 2 °C.min⁻¹. A temperatura de transição vítrea (T_g) foi determinada a partir do início do decaimento da curva do módulo de armazenamento (E') e pelo pico da tangente de delta ($\tan \delta$). Foram analisados dois provetes para cada tipo de laminado, por tipo de ensaio e condição de envelhecimento (período e temperatura de imersão e estado de humidade – húmido e seco).

Envelhecimento higrotérmico. Nesta campanha experimental, a durabilidade dos laminados LBUP e LCVE está a ser avaliada por meio de envelhecimento higrotérmico seguido de caracterização por meio de ensaios mecânicos e termomecânicos em períodos pré-determinados, cujos resultados são comparados com os de ensaios em material não envelhecido (de referência). Para o envelhecimento, os provetes (cortados nas dimensões necessárias para cada tipo de ensaio) foram imersos em recipientes com água, que, por sua vez, foram colocados em câmaras térmicas com temperaturas controladas de 20 °C, 35 °C e 50 °C (Figura 1). Para além dos ensaios iniciais, já foram realizados ensaios aos laminados após 1, 3 e 6 meses de envelhecimento higrotérmico, em condição húmida e seca; no âmbito do projeto em que se insere este estudo, serão ainda realizados testes adicionais após 12 meses de envelhecimento, e desenvolvidos modelos analíticos para prever (extrapolar) o comportamento a longo prazo dos laminados [5].

Os provetes foram ensaiados (i) no estado húmido, mantendo-se fora da água por um período máximo de 5 h antes dos ensaios, e (ii) no estado seco, tendo-se aferido o peso das amostras até que a variação relativa entre pesagens sucessivas (espaçadas de 24 h) fosse inferior a 0.01%; a comparação dos resultados nestes dois estados teve por objetivo avaliar a contribuição relativa da degradação devido a fenómenos irreversíveis (e.g., hidrólise) e reversíveis (e.g., plasticização).

Adiante, na apresentação e discussão dos resultados, será utilizado o termo “retenção de propriedade” para descrever o quociente entre o valor de uma determinada propriedade após o envelhecimento e o respetivo valor inicial dessa mesma propriedade. As letras W e D denotam, respetivamente, materiais testados nos estados húmidos (*wet*) e seco (*dry*) após o envelhecimento higrotérmico; o número 20, 35 ou 50 representa a temperatura de imersão em °C. Por exemplo, WLBUP.35 representa o laminado ensaiado no estado húmido (W) com matriz de resina de poliéster insaturado parcialmente bio-derivado (LBUP), envelhecido por imersão a 35 °C (.35).



Figura 1: Câmaras de envelhecimento acelerado com temperatura controlada.

Resultados e discussão

Caracterização inicial. A Tabela 1 apresenta os resultados dos ensaios de tração, realizados na direção da pultrusão, em que se mediu a resistência (σ_{Max}), o módulo de elasticidade (E) e a extensão na rotura (ϵ_{Max}).

Tabela 1: Resultados iniciais dos testes de tração

Parâmetro	LBUP			LCVE		
	σ_{Max} [MPa]	E [GPa]	ϵ_{Max} [%]	σ_{Max} [MPa]	E [GPa]	ϵ_{Max} [%]
\bar{x}	2030	165,8	1,4	1946	173,6	1,3
σ	171	4,0	0,1	45	3,7	0,1
v	8,4%	2,4%	9,9%	2,3%	2,2%	10,2%

Os resultados listados na Tabela 1 mostram que as propriedades mecânicas de curto prazo em tração de ambos os tipos de laminados são muito semelhantes. Por exemplo, o valor médio da resistência à tração dos bio-laminados foi ligeiramente (+4%) superior, o módulo de elasticidade foi ligeiramente (-4,5%) inferior e a deformação na rotura foi superior (+10%) por comparação com o laminado convencional. Para qualquer uma das propriedades, as diferenças relativas estão dentro da incerteza experimental (tendo em conta os valores dos coeficientes de variação). De um modo geral, estes resultados demonstram o potencial da resina de base bioderivada para ser utilizada num compósito de CFRP de elevado desempenho estrutural, no que se refere ao seu desempenho inicial ou de curto prazo.

Na Tabela 2, apresentam-se os resultados dos ensaios de resistência ao corte interlaminar (ILSS) dos laminados LBUP e LCVE, indicando-se o valor médio (\bar{x}), o desvio padrão (σ) e o coeficiente de variação (CoV). Estes resultados sugerem uma boa adesão entre a bio-resina e as mechas de fibra de carbono, já que o valor médio da ILSS do laminado de CFRP bio-derivado foi apenas ligeiramente inferior (-10%) ao do laminado convencional.

Tabela 2: Resultados de caracterização inicial da resistência ao corte interlaminar (ILSS)

Parâmetro	Tensão de corte interlaminar [MPa]	
	LBUP	LCVE
\bar{x}	40,4	44,9
σ	1,1	1,8
CoV	2,7%	4,0%

A Figura 2 mostra os resultados de DMA para ambos os laminados, ilustrando as curvas do módulo de armazenamento (E'), do módulo de perda (E'') e da $\tan \delta$. Como é normal, a curva de E' apresenta um andamento sigmoidal, com uma redução significativa ao longo da transição vítrea,

enquanto as curvas de E'' e $\tan \delta$ apresentam picos bem definidos nessa transição. A T_g estimada a partir do início do decaimento do módulo de armazenamento em escala logarítmica (tal como preconizado na CEN/TS 19101) é 79 °C para o laminado LBUP e 80 °C para o laminado LCVE; já a T_g daqueles laminados estimada com base no pico da $\tan \delta$ é respectivamente 140°C e 135°C, respectivamente. De um modo geral, quer os valores das estimativas de T_g , quer as diferentes curvas obtidas nos ensaios de DMA não revelam diferenças significativas entre os laminados de CFRP quanto ao seu comportamento termomecânico inicial.

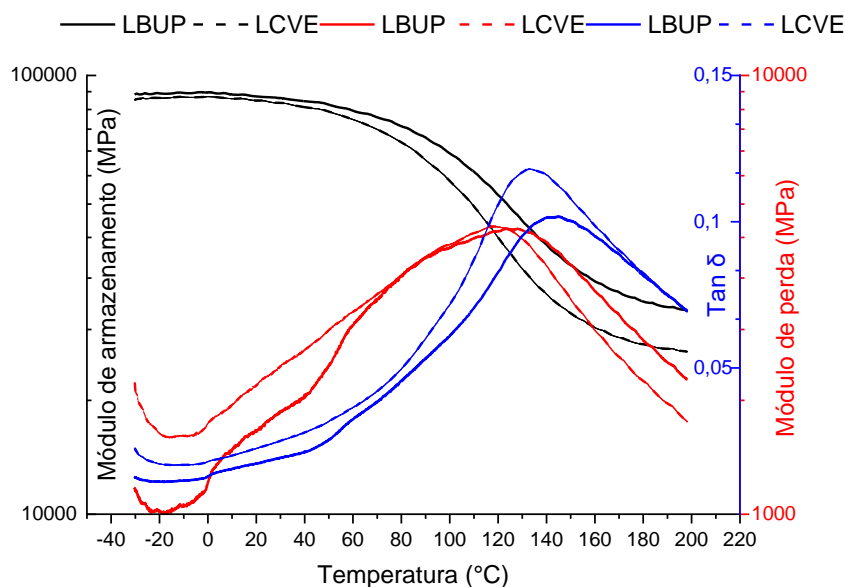


Figura 2: DMA para laminados LBUP e LCVE antes do envelhecimento higrotérmico

Ensaio de tração pós-envelhecimento. A Figura 3 mostra os resultados dos ensaios de tração aos provetes LBUP, em termos da retenção percentual da resistência à tração (σ_{Max}) em relação à caracterização inicial (o CoV variou entre 7% e 12% para os DLBUP, com exceção do ensaio DLBUP.35¹ com um mês de envelhecimento, que teve um CoV de 19%; já para os WLBUP, os CoV variaram entre 6% e 14%). É clara uma tendência de redução acentuada da resistência à tração com o aumento do período de imersão e, também, da respetiva temperatura – no estado húmido, registaram-se reduções máximas de 15%, 38% e 41% a 20 °C, 35 °C e 50 °C, respetivamente. De um modo geral, em todos os períodos e temperaturas de imersão, ocorreu uma reversão da degradação no material ensaiado no estado seco (registam-se alguma exceções, sobretudo aos 3 meses a 35 °C²) – tal deve-se à parcela reversível da degradação, tipicamente provocada pelo fenómeno de plasticização; por exemplo, após 6 meses de imersão a 35 °C e 50 °C, a reversão da resistência à tração após secagem é +26% e +19%, respetivamente (a 20 °C, a resistência no estado seco é ligeiramente inferior à resistência no estado húmido). A proximidade dos valores obtidos no estado seco para as três temperaturas de envelhecimento sugere um balanço (variável com o tempo e a temperatura) a resultar da competição entre o efeito irreversível da hidrólise e o fenómeno de pós-cura da matriz polimérica devido à temperatura elevada.

A Figura 4 mostra a retenção do módulo de elasticidade (E) dos provetes LBUP em relação aos valores iniciais (neste caso, o CoV variou entre 1% e 13% para os DLBUP, com exceção do ensaio DLBUP.35¹) e entre 1% e 16% para os WLBUP). Observa-se uma tendência de redução do módulo de elasticidade com o tempo de imersão, registando-se reduções máximas (excluindo o ensaio para a condição DLBUP.35, que, como referido, aparenta ter sido anómalo) de 13% após 6 meses (WLBUP.20).

¹ Os resultados da série DBUPE.35 parecem ser anómalos e, por essa razão, serão repetidos no decorrer do projeto; de facto, a redução de resistência no estado seco foi superior ao que seria de esperar, com um decréscimo adicional de retenção de cerca de 20% face ao estado húmido.

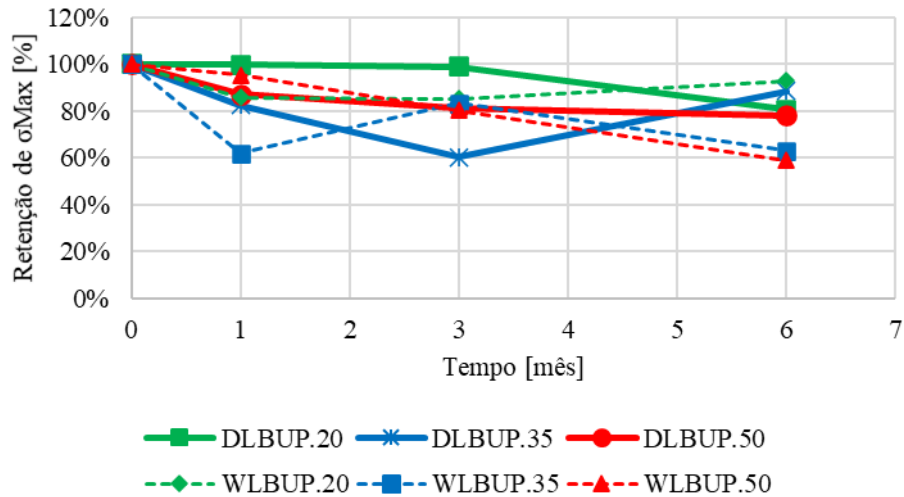


Figura 3: Retenção da σ_{Max} à tração para laminados LBUPE nos estados seco e húmido

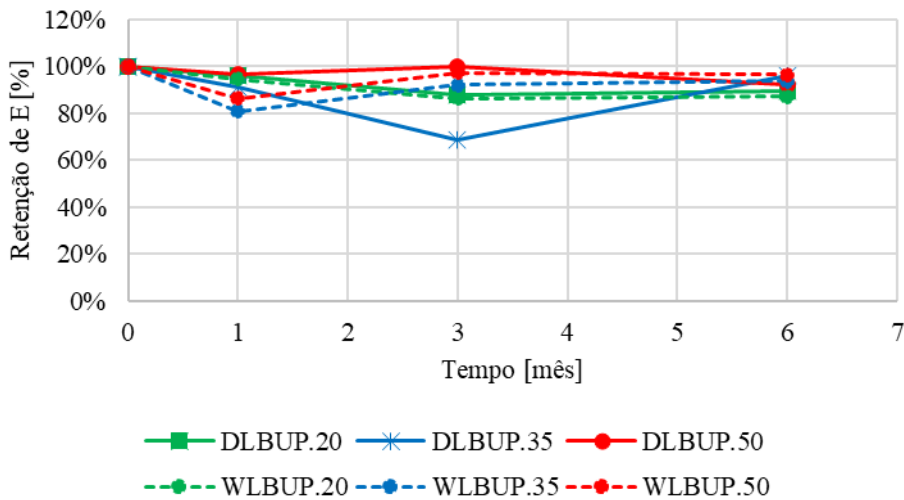


Figura 4: Retenção do módulo de elasticidade para laminados LBUPE nos estados seco e húmido

Tal como no caso da resistência à tração, com a secagem, verifica-se uma recuperação significativa, o que novamente traduz a componente reversível da degradação, provavelmente causada pelo fenómeno da plasticização. Por comparação com a resistência à tração, o módulo de elasticidade é significativamente menos afetado pelo envelhecimento higrótérmico acelerado. Este resultado é lógico, uma vez que o módulo de elasticidade depende essencialmente das fibras de reforço, que terão sido menos afetadas do que a matriz, que condiciona de forma mais significativa a resistência à tração, pela sua importante função de garantir uma distribuição uniforme de tensões entre as fibras de reforço.

A Figura 5 mostra, para cada uma das condições e períodos de envelhecimento, a retenção da resistência à tração dos laminados LCVE (o CoV variou entre 5% e 11% para a série DLCVE e entre 3% e 9% para a série WLCVE). Em termos globais, nos laminados convencionais, a redução da resistência à tração é menor do que no caso dos laminados bio-derivados. Em geral, regista-se uma maior degradação com o período e temperatura de imersão, com uma redução máxima de resistência de 33% após 6 meses de imersão a 50 °C (WLCVE.50). Contudo, é de referir que, para o período de análise, para cada um dos ambientes, a variação da resistência à tração não segue uma tendência monotónica, registando-se, pontualmente, alguns aumentos entre períodos, que estarão associados aos efeitos dos fenómenos de pós-cura. Tal como nos bio-laminados, verifica-se uma recuperação da resistência à tração após secagem, que é mais notória para as temperaturas mais elevadas: após 6 meses de imersão a 35 °C e 50°C, a recuperação da resistência à tração é de +20% e +26%, respetivamente, sendo praticamente atingidos os valores iniciais. Isto mostra que os

fenómenos de degradação observados são, em grande medida, reversíveis, provavelmente associados à plasticização da matriz polimérica.

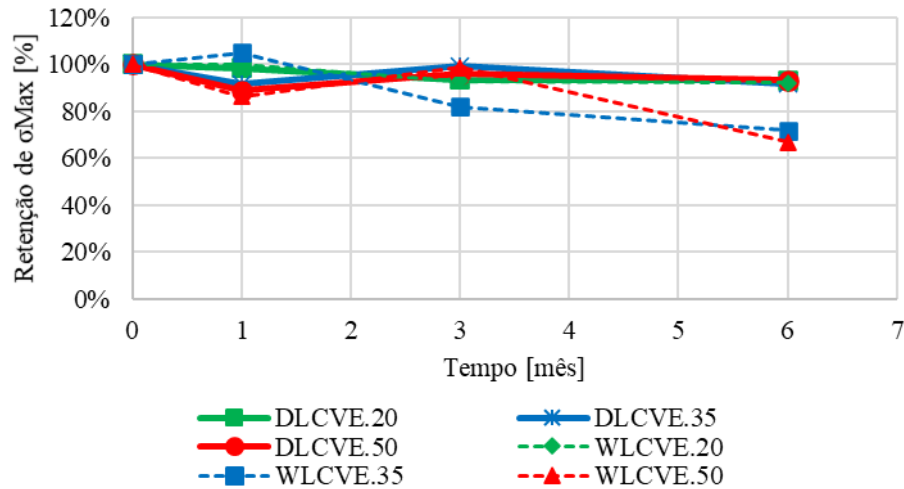


Figura 5: Retenção da σ_{Max} à tração para laminados LCVE nos estados seco e húmido

A Figura 6 mostra a retenção do módulo de elasticidade dos laminados LCVE (o CoV variou entre 0,4% e 7% para os DLCVE, e entre 1% e 9% para os WLCVE, com exceção do WLCVE.50 após 6 meses, em que foi 18%). Os resultados mostram que o módulo de elasticidade foi muito pouco afetado pelo envelhecimento higrotérmico, tendo-se registado uma redução máxima de 13% após 6 meses de imersão a 20 °C. Para esse período, após secagem dos provetes, regista-se (i) um aumento do módulo de elasticidade face aos valores medidos após 3 meses de imersão e, novamente, (ii) uma ligeira recuperação entre os estados húmido e seco. Estes resultados revelam a reversibilidade com a secagem da (ligeira) degradação provocada pela imersão e, também, alguns efeitos de pós-cura. Como referido, as elevadas retenções observadas para o módulo de elasticidade devem-se ao facto desta propriedade ser essencialmente dominada pelas fibras.

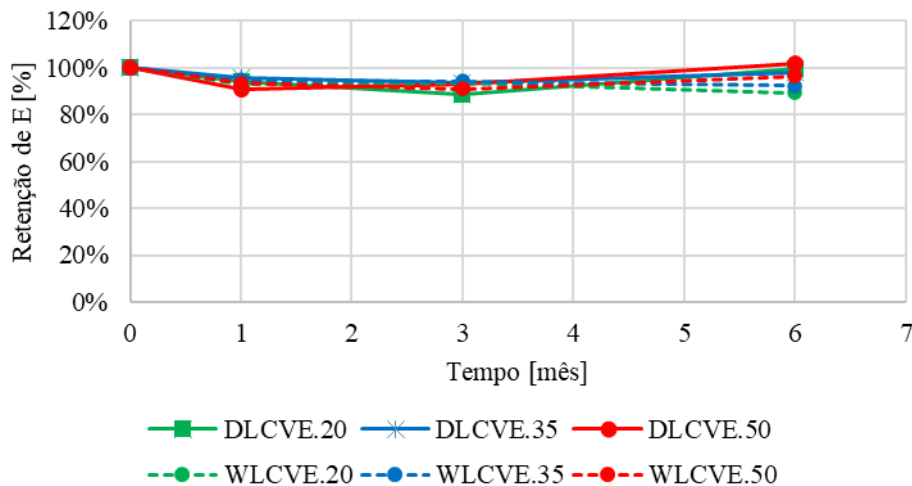


Figura 6: Retenção do módulo de elasticidade para laminados LCVE nos estados seco e húmido

Ensaio de corte interlaminar pós-envelhecimento. A Figura 7 mostra os resultados dos ensaios de ILSS para os laminados LBUP, em termos da retenção percentual da propriedade em relação à caracterização inicial (o CoV variou entre 3% e 10% para os DLBUP e entre 1% e 6% para os WLBUP). É clara a tendência de redução do ILSS com o aumento do tempo e da temperatura de imersão. É de salientar o facto desta propriedade, ao contrário das anteriores, depender essencialmente da matriz polimérica e da integridade da sua aderência às fibras de reforço (interface fibra-matriz). Neste caso, registam-se reduções máximas muito significativas de 51% após 6 meses de imersão a 50 °C. Tal como nas propriedades anteriores, com a secagem, verifica-se

alguma recuperação da ILSS; a magnitude desta recuperação parece diminuir com o tempo e temperatura de imersão, o que aponta para uma maior relevância do fenómeno de hidrólise face ao de plasticização. Por exemplo, ao fim de 1, 3 e 6 meses de imersão a 50 °C, a recuperação de ILSS após secagem é de respetivamente 14%, 6% e 5%.

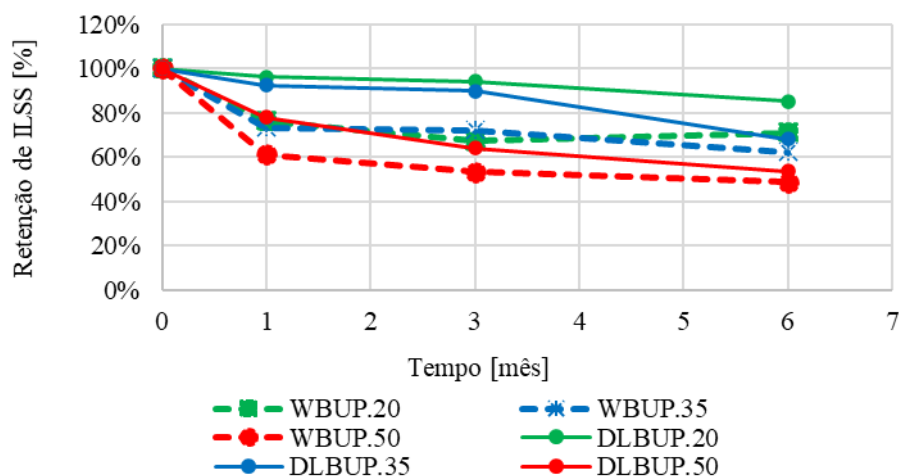


Figura 7: Retenção da ILSS para LBUPE nos estados seco e húmido

A Figura 8 mostra os resultados dos ensaios de ILSS para os laminados LCVE (o CoV variou entre 0,4% e 7% para os WLCVE, e entre 1% e 4% para os DLCVE, com exceção das séries DLCVE.20 e DLCVE.35 após 1 mês, cujo CoV foi mais elevado, 20% e 17% respetivamente). Por comparação com os bio-laminados, é possível observar que os efeitos da degradação são muito menos significativos, com redução máxima de 7% após 6 meses de imersão a 50 °C (WLCVE.50). É inclusivamente de registar aumentos de ILSS, de maior magnitude no estado seco, com valor máximo de 8% após 3 meses de imersão a 35 °C; estes aumentos estarão muito provavelmente associados aos já referidos efeitos de pós-cura da matriz polimérica dos laminados.

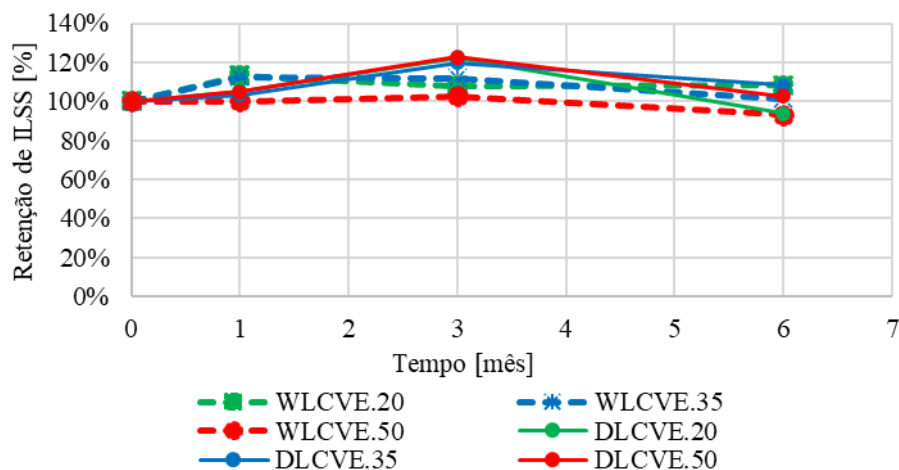


Figura 8: Retenção da ILSS para laminados LCVE nos estados seco e húmido

Ensaio de DMA pós-envelhecimento. A Figura 9 e a Figura 10 apresentam a variação da T_g dos laminados LBUP e LCVE, respetivamente, estimados com base no início do decaimento do módulo de armazenamento. Neste caso, ainda não foi possível efetuar os ensaios ao material no estado húmido ao fim de 1 e 3 meses; por essa razão, apresenta-se uma linha de tendência em pontilhado entre a condição inicial e os resultados obtidos após 6 meses de imersão.

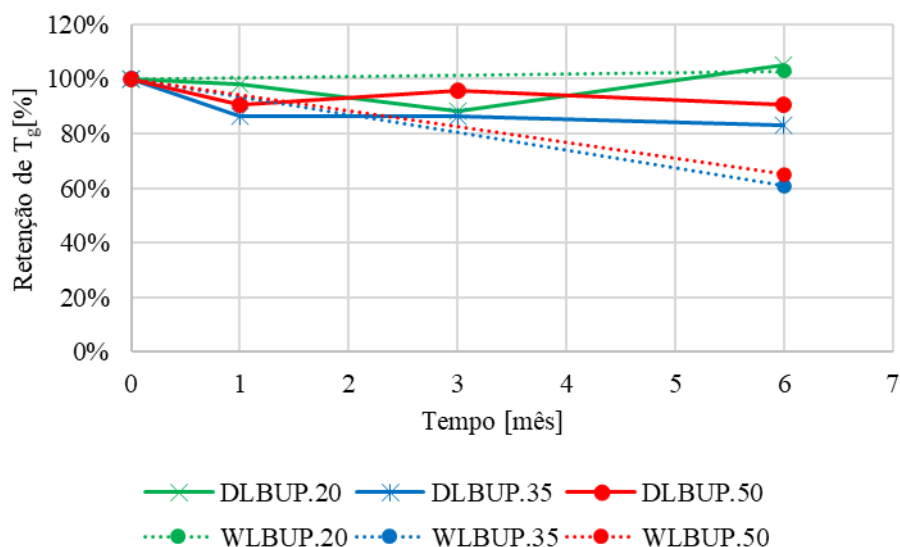


Figura 9: Retenção da T_g para laminados LBUP nos estados seco e húmido

No caso dos laminados LBUP, após 6 meses, observa-se que a T_g não teve variações muito significativas devido à imersão a 20 °C, em ambos os estados, húmido e seco; já devido à imersão a 35 °C e a 50 °C, a redução da T_g foi muito significativa (39% e 35%, respetivamente); contudo, uma parte considerável desta redução foi revertida por secagem (aumentos de +22% e +25%, respetivamente), mostrando a importância da plasticização na redução da T_g em estado húmido [9].

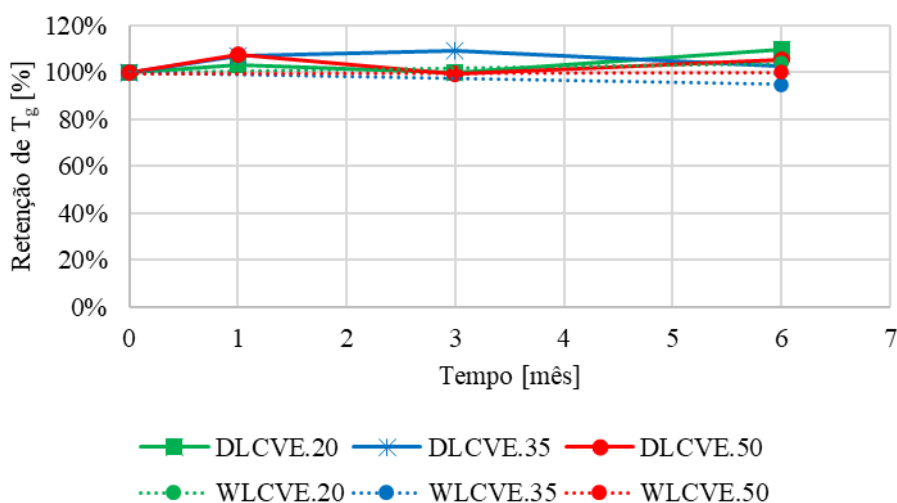


Figura 10: Retenção da T_g para laminados LCVE nos estados seco e húmido

No caso dos laminados convencionais LCVE, a T_g apresentou uma variação pouco significativa para todos os ambientes de exposição, com uma redução máxima de 5% após 6 meses de imersão a 50 °C e aumentos de até 10%, que evidenciam efeitos de pós-cura. Estes resultados são consistentes com os anteriores, nomeadamente com os ensaios de ILSS.

Considerações finais

Neste artigo foram apresentados os resultados de um estudo experimental em curso, que tem como objetivo avaliar e comparar a durabilidade devido à exposição higrotérmica de dois laminados de fibras de carbono, produzidos pelo processo de pultrusão. Num dos laminados, foi utilizada uma resina de poliéster isoftálico insaturado com conteúdo parcialmente renovável (laminados LBUP) e, no outro, foi utilizada uma resina convencional à base de epóxi-viniléster (laminados LCVE). A durabilidade dos laminados foi avaliada no que se refere à variação das suas propriedades mecânicas e termomecânicas, por comparação com as propriedades iniciais dos materiais.

Os resultados dos ensaios de caracterização inicial daquelas propriedades demonstraram o elevado potencial da utilização da bio-resina na produção de bio-laminados de CFRP por pultrusão. Por outro lado, após imersão em água até 6 meses, para todas as propriedades analisadas, os ensaios revelaram a ocorrência de hidrólise e/ou plasticização, que foram claramente mais severas nos laminados LBUP do que nos LCVE, sendo esta degradação agravada por temperaturas de imersão mais elevadas.

Para os laminados produzidos com a resina bio-derivada, a propriedade mais dominada pela resina - ILSS – apresentou, como seria de esperar, a degradação de maior magnitude (51% após 6 meses de imersão a 50 °C). Após secagem, a retenção de resistência neste ensaio foi também a menor, sugerindo que as reduções de ILSS ocorreram principalmente devido a fenômenos de degradação química irreversível (hidrólise), especialmente após imersão a temperaturas mais elevadas, embora a recuperação observada após secagem também sugira a ocorrência de alguma degradação física reversível.

A resistência à tração e o módulo de elasticidade, propriedades mais influenciadas pelas fibras e menos dependentes da matriz, sobretudo a segunda, foram significativamente menos afetadas pelo envelhecimento higrotérmico. Contudo, no caso da resistência à tração, a redução de resistência do bio-laminado apresentou valores elevados (até 19% após 6 meses de imersão a 50 °C), presumivelmente evidenciando um efeito significativo da degradação da matriz polimérica e da interface fibra-matriz, que têm uma função relevante de distribuir as tensões de forma uniforme entre as fibras de reforço.

Pelas características da técnica DMA, na qual se aplicam deformações oscilatórias de pequena amplitude, tipicamente introduzindo tensões muito reduzidas no material, o efeito da degradação da interface fibra-matriz na T_g não é tão notório quanto para o ILSS; contudo, no caso dos bio-laminados, a redução da T_g após imersão a 35 °C e 50 °C foi significativa (após 6 meses, 39% e 35%, respetivamente), tendo-se registado uma recuperação relevante com a secagem (de +22% e +25%, respetivamente), o que traduz a relevância da plasticização e, provavelmente, de efeitos competitivos associados à pós-cura.

Globalmente, estes resultados apontam para a necessidade de melhoria da durabilidade do bio-laminado desenvolvido, nomeadamente para aplicações em ambientes húmidos. Estas melhorias podem envolver modificações na cadeia principal da bio-resina e nos diluentes reativos utilizados no desenvolvimento do polímero. Já para aplicações em que a influência da humidade não seja muito relevante (por exemplo, em ambientes interiores ou em elementos estruturais que não estejam diretamente expostos à ação direta da chuva), os resultados obtidos apontam para a possibilidade de utilização dos bio-laminados desenvolvidos.

Agradecimentos

Os autores agradecem à ANI e à FCT o financiamento concedido aos projetos BioLam (POCI-01-0247-FEDER-039769 LISBOA) e EcoComposite (PTDC/ECI-EGC/29597/2017), respetivamente. A primeira autora agradece à FCT o financiamento concedido para a sua bolsa de doutoramento (SFRH/BD/04675/2020).

Referências

- [1] A.K. Mohanty, S. Vivekanandhan, J.M. Pin, M. Misra, *Composites from renewable and sustainable resources: Challenges and innovations*, Science. 362 (2018) 536–542. <https://doi.org/10.1126/science.aat9072>.
- [2] F. Johnsson, I. Karlsson, J. Rootzén, A. Ahlbäck, M. Gustavsson, *The framing of a sustainable development goals assessment in decarbonizing the construction industry – Avoiding Greenwashing*, Renew. Sustain. Energy Rev. 131 (2020) 110029. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2020.110029>.

- [3] M. Hofmann, A.T. Shahid, M. Machado, M. Garrido, J.C. Bordado, J.R. Correia, *GFRP biocomposites produced with a novel high-performance bio-based unsaturated polyester resin*, *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 161 (2022) 107098. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESA.2022.107098>.
- [4] M.A. Hofmann, *Sustainable bio-based resins and fibre-polymer composites for civil engineering structural applications*, Ph.D, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, (2022).
- [5] M. Garrido, J.M. Sousa, J.R. Correia, S. Cabral-Fonseca, *Prediction of long-term performance and definition of a moisture conversion factor for the durability design of pultruded GFRP profiles under hygrothermal exposure*, *Constr. Build. Mater.* 326 (2022) 126856. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2022.126856> .
- [6] M.A.G. Silva, B.S. da Fonseca, H. Biscaia, *On estimates of durability of FRP based on accelerated tests*, *Compos. Struct.* 116 (2014) 377–387. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2014.05.022>.
- [7] S. Russo, B. Ghadimi, K. Lawania, M. Rosano, *Residual strength testing in pultruded FRP material under a variety of temperature cycles and values*, *Compos. Struct.* 133 (2015) 458–475. <https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2015.07.034>.
- [8] T.Q. Liu, X. Liu, P. Feng, *A comprehensive review on mechanical properties of pultruded FRP composites subjected to long-term environmental effects*, *Compos. Part B Eng.* 191 (2020). 107958 <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2020.107958>.
- [9] V.M. Karbhari, *Introduction: the use of composites in civil structural applications*, *Durab. Compos. Civ. Struct. Appl.* (2007) 1–10. <https://doi.org/10.1533/9781845693565.1>.
- [10] J. Xie, Z. Lu, Y. Guo, Y. Huang, *Durability of CFRP sheets and epoxy resin exposed to natural hygrothermal or cyclic wet-dry environment*, *Polym. Compos.* 40 (2019) 553–567. <https://doi.org/10.1002/PC.24687>
- [11] C. McSwiggan, A. Fam, *Tensile properties retention of aged carbon-FRP sheets made of fully and partially bio-based resins and conventional epoxy*, *Polym. Compos.* 39 (2018) 2081–2092. <https://doi.org/10.1002/PC.24170> .
- [12] B.P. Chang, A.K. Mohanty, M. Misra, *Studies on durability of sustainable biobased composites: a review*, *RCS Advances* (2020) 17955-17999. <https://doi.org/10.1039/c9ra09554c>.
- [13] M.A. Hofmann, A.T. Shahid, M. Garrido, M.J. Ferreira, J.R. Correia, J.C. Bordado, *Biobased Thermosetting Polyester Resin for High-Performance Applications*, *ACS Sustain. Chem. Eng.* (2022) 3442–3454. <https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.1C06969> .

Influência da incorporação de resíduos de construção e demolição com material de mudança de fase nas propriedades mecânicas de betões

JIA Zhiyou^{1, a}, CUNHA Sandra^{1, b} e AGUIAR José^{1, c}

¹Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho,
Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

^apg39237@alunos.uminho.pt, ^bsandracunha@civil.uminho.pt, ^caguiar@civil.uminho.pt

Palavras-chave: Betão térmico, Resíduos de construção e demolição, Material de Mudança de Fase, resistência à compressão

Resumo. O crescimento das urbanizações levou ao rápido desenvolvimento da indústria da construção, originando uma grande quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD) e em simultâneo um aumento nos consumos energéticos e emissões de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera. A aplicação simultânea de RCD e tecnologias de calor latente incorporadas em betões permite a reutilização de agregados reciclados, mas também minimizar o consumo de energia durante o período de utilização do edifício. Este estudo tem como principal objetivo a avaliação da incorporação de material de mudança de fase (PCM) em agregado reciclado proveniente de RCD, utilizado em substituição do agregado natural para a produção de betões, assim como a avaliação do comportamento mecânico dos betões produzidos. A incorporação de PCM no agregado reciclado foi efetuada segundo duas técnicas distintas, a vácuo e a pressão atmosférica, sendo produzidos betões com os diferentes agregados. Foi possível verificar que a presença do agregado reciclado dopado com PCM afetou negativamente o desempenho mecânico das diferentes formulações de betão desenvolvidas.

Introdução

O rápido crescimento da população mundial e o desenvolvimento das urbanizações levaram ao rápido desenvolvimento da indústria da construção, originando também uma grande quantidade de resíduos de construção e demolição (RCD). A produção mundial de resíduos sólidos tem vindo a aumentar significativamente, passando de uma quantidade inferior a 0,3 milhões de toneladas (Mt.) por dia em 1900, para mais de 3,5 Mt. por dia em 2010, prevendo-se ainda que possa vir a duplicar em 2025 e a triplicar em 2100 [1]. O simples tratamento em aterro sanitário dos RCD tem causado uma elevada poluição ambiental e danos ecológicos, de modo que o tratamento racional e a reutilização de recursos de RCD tornaram-se um tema importante para a indústria da construção e para a comunidade científica. Até ao momento, a Europa, os Estados Unidos da América, o Japão e a Coreia do Sul possuem uma política de gestão e reutilização de recursos relativos aos RCD já implementada [2]. Contudo, países em desenvolvimento como a China e a Índia ainda apresentam uma taxa de utilização destes resíduos muito baixa, sendo de 5% a 10% [3] e de 1% [4], respetivamente.

As estatísticas da equipa do investigador Chen [5] e da equipa do Banco Mundial [6], reportaram um rápido desenvolvimento da urbanização global, especialmente no que diz respeito à taxa de urbanização da China que aumentou de cerca de 18% em 1978 para 64% em 2020 e também nos Estados Unidos da América e na União Europeia cuja taxa de urbanização é cerca de 83% e 75% em 2020, respetivamente. Associado ao desenvolvimento da urbanização global encontra-se também o rápido desenvolvimento do setor de construção e em consequência uma elevada produção de resíduos de construção e demolição e consumos energéticos. A China, os Estados Unidos da América e a UE (União Europeia 28 países) têm vindo a apresentar a maior produção anual de RCD em todo mundo [7], no entanto, em 2018, a taxa de utilização desses recursos na China foi de apenas 10% [8], muito inferior aos 76% [9] e 90% [10] dos Estados Unidos da América e da UE.

Por muito tempo, a China adotou métodos simples de acumulação e disposição em aterros de RCD, que levaram à ocupação de muito espaço e desperdiçaram muitos recursos, destruindo também o meio ambiente. Diante desta problemática, como tratar e regenerar de forma abrangente os RCD, este tornou-se um assunto de elevado interesse e importância no sector de construção. Segundo Elshaboury et al. [11], de 2001 a 2021, um total de 895 artigos acadêmicos foram publicados sobre RCD, e seu campo de aplicação envolveu estradas, tijolo/bloco, betão, argamassa, etc. Vários trabalhos têm sido desenvolvidos reutilizando RCD como agregado em betão [12] [13] [14] [15] [16] [17]. Zheng et al. [18] desenvolveram um estudo no qual efetuaram a substituição de agregado natural nos teores de 0, 25, 50, 75 e 100% por agregado de betão reciclado e agregado de tijolo reciclado, com tamanho de partícula compreendido entre 4 a 32,5 mm em betão C25, com a relação de água/ligante de 0.55 e betão C50, com a relação de água/ligante de 0.35. Os resultados obtidos permitiram observar que o aumento do teor de agregado reciclado originou uma diminuição na resistência do betão.

Por outro lado, os consumos energéticos são cada vez mais significativos, as fontes de energia não renováveis, como o petróleo e o gás natural, estão cada vez mais esgotadas e a crise energética é cada vez mais grave [19]. Tendo, também sido recentemente agravada pelos graves conflitos internacionais, sem precedentes, a que temos assistido. Tyagi [20] apontou que os sistemas de aquecimento e arrefecimento dos edifícios consomem 40% de energia, enquanto produzem uma grande quantidade de emissões de carbono. A Agência Internacional de Energia (IEA) [21] informou que o consumo total de energia para aquecimento, arrefecimento e produção de água quente nos edifícios em todo o mundo em 2017 foi de cerca de 10^{15} kJ, representando cerca de 20% do consumo global de energia. A maior contribuição para o consumo mundial de energia em edifícios são as economias emergentes como a China, o Brasil, a Índia entre outros países. Entre eles, de acordo com as estatísticas do Comitê de Estatísticas de Consumo de Energia da Associação de Conservação de Energia de Edifícios da China [22], o consumo nacional de energia na fase de operação dos edifícios em 2018 foi de $2,93 \times 10^{16}$ kJ, cerca de 21,7% do consumo nacional de energia, e as emissões de dióxido de carbono foram de 2,1 bilhões de toneladas, correspondendo a cerca de 22% do total das emissões do país. Desta forma, verifica-se também a necessidade de atuar nesta problemática do setor da construção, através da utilização de materiais funcionais, tais como os materiais de mudança de fase (PCM). O PCM é um material baseado em energia verde [23]. Embora não possa gerar nenhuma forma de energia por si só, este pode usar o seu efeito térmico de mudança de fase para armazenar o calor perdido no ambiente externo na forma de calor latente e, liberar e utilizar a energia em condições adequadas para melhorar a eficiência energética dos edifícios [24, 25], substituindo em parte o recurso a combustíveis fósseis. Estes materiais podem ser utilizados como meio de armazenamento térmico para aquecimento solar passivo [25], podendo ser incorporados em argamassas [29, 30], placas de gesso cartonado [31, 32], betão [30] [31] [32], ou em tijolos e blocos [35, 36]. Portanto, a investigação e desenvolvimento de novos materiais de construção com capacidade de armazenamento de energia tem vindo a tornar-se numa questão de extrema importância para a comunidade científica, tendo como base a utilização eficiente de várias fontes de energia [19, 20], de modo a aliviar efetivamente a pressão causada pela perda de recursos provenientes de fontes não renováveis e a degradação ambiental.

O principal objetivo deste trabalho consistiu em combinar a tecnologia de calor latente e os RCD para preparar um betão térmico, avaliando-se a influência no estado fresco e endurecido dos betões, dos diferentes métodos de incorporação de PCM nos RCD. Assim, foram desenvolvidas várias formulações de betão com incorporação de diferentes teores RCD dopados com PCM. A incorporação de PCM nos RCD foi realizada com base em duas técnicas distintas, sendo estas a pressão atmosférica e o vácuo.

Procedimento Experimental

Matérias-primas. Neste trabalho foram utilizados agregados de origem natural (Areia e Brita) e agregado proveniente de resíduos de construção e demolição.

Os RCD (Figura 1) foram fornecidos pela empresa Resíduos de Construção e Demolição de

Portugal, com dimensões entre 0 a 10 mm. De forma a se substituir a Brita de origem natural, o RCD foi peneirado de modo a separar as partículas com dimensões compreendidas entre 4 e 10 mm, (Figura 2). A massa volúmica das partículas secas e absorção de água do RCD foram determinados experimentalmente de acordo com a norma NP 581 [37], tendo-se obtido uma massa volúmica de 2134 kg/m³ e uma absorção de água de 7.82%. A massa volúmica e absorção de água foram determinadas de acordo a mesma norma, sendo 2197 kg/m³ e uma absorção de água de 0.51%, respetivamente. A areia do rio utilizada apresentou dimensões compreendidas entre 0-4 mm, de acordo com a norma NP 954 [38], a massa volúmica e absorção de água da areia do rio foram determinadas, sendo de 2563 kg/m³ e de 1.19%, respetivamente.

O PCM selecionado foi uma parafina pura (PCM-PP) com temperatura de transição de cerca de 22°C, comercialmente designada de RT22HC, proveniente da empresa RUBITHERM®, sediada na Alemanha. A Tabela 1 apresenta as principais características do material de mudança de fase. Foi medida a expansão volumétrica que o PCM-PP apresenta durante a mudança de fase, tendo-se verificado que esta representa 2.7%, o que não é suficiente para causar danos significativos ao agregado reciclado proveniente dos RCD.

O cimento selecionado é um CEM I 42.5R, com uma massa volúmica de 3120 kg/m³.



Figura 1: Resíduos de construção e demolição (RCD).

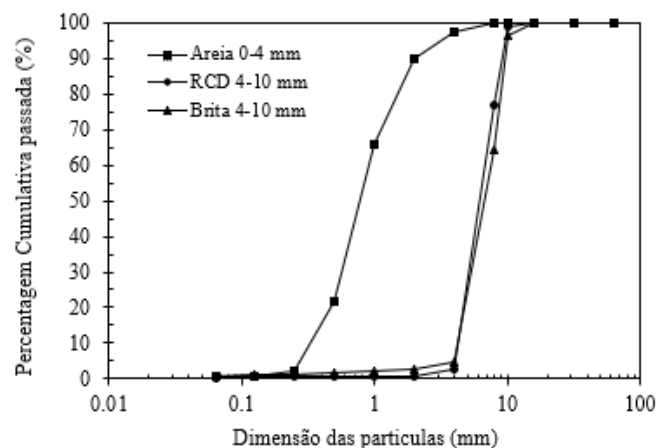


Figura 2: Curva granulométrica dos agregados.

Tabela 1: Os parâmetros deste PP (dados da empresa RUBITHERM®)

Características	Resultados	
Temperatura de fusão	20-23	(°C)
Temperatura de solidificação	23-22	(°C)
Capacidade de armazenamento de calor	190	(kJ/kg)
Capacidade de calor específico	2	(kJ/kg·k)
Massa volúmica no estado sólido (20 °C)	0.76	(kg/L)
Massa volúmica no estado líquido (50 °C)	0.7	(kg/L)
Condutividade térmica	0.2	(W/(m·k))
Ponto de inflamação	>150	(°C)
Temperatura máxima de operação	50	(°C)

Funcionalização do agregado de RCD com PCM-PP. A absorção de PCM-PP pelo RCD foi realizada segundo dois métodos distintos, sendo estes, absorção à pressão atmosférica (Figura 3 a)) e absorção a vácuo (Figura 3 b)). De forma a garantir uma correta absorção de PCM-PP pelo RCD, foi necessário garantir que o material de mudança de fase se encontra no estado líquido, pelo que este foi colocado numa estufa a uma temperatura de 35°C, durante 30 minutos anteriores à sua utilização. A temperatura seleccionada para o acondicionamento do material teve em conta a temperatura de fusão do PCM-PP (22°C), de forma a garantir que todo o material se encontra no estado líquido. Para a técnica de absorção por imersão utilizando vácuo, o equipamento de contenção dos materiais foi também colocado no interior da estufa a 35°C, de forma a minimizar qualquer possibilidade do material de mudança de fase poder inicializar o seu processo de solidificação durante a funcionalização do agregado de RCD.



Figura 3: Absorção de PCM-PP pelo RCD.

De forma a garantir a máxima absorção de PCM-PP pelo RCD com dimensões de 4-10 mm, o material foi seco previamente em estufa a 105 °C durante 24 horas, eliminando a existência de qualquer humidade, sendo posteriormente realizada a absorção do PCM-PP em ambiente controlado. Relativamente à absorção do PCM-PP pelo agregado reciclado por imersão a pressão atmosférica, as partículas de RCD foram imersas diretamente num recipiente com PCM líquido durante uma hora ou 4 horas. No caso da absorção de PCM-PP por imersão a vácuo, as partículas de RCD foram inicialmente colocadas em vácuo, retirando todo o ar existente na amostra durante 3 horas. Em seguida, o PCM foi introduzido com recurso a vácuo, sendo realizada uma amostra com introdução durante uma hora e uma segunda amostra com introdução de PCM a vácuo durante 4 horas, tal como realizada para a funcionalização do agregado à pressão atmosférica. A Figura 4 apresenta a absorção de PCM-PP pelo agregado reciclado, segundo os diferentes métodos e tempos de imersão.

Tal como se pode observar relativamente à imersão do agregado reciclado de RCD durante 1 hora em material de mudança de fase, a utilização de vácuo origina um aumento na absorção de PCM-PP de cerca de 14%, relativamente à absorção à pressão atmosférica. No que diz respeito à imersão do agregado em PCM-PP durante 4 horas a utilização de vácuo origina um aumento na absorção de cerca de 9%, em relação à absorção à pressão atmosférica. Efetuando uma comparação no que diz respeito ao tempo de imersão utilizado, pode ser observado que na utilização da absorção à pressão atmosférica a imersão durante 4 horas origina um aumento de cerca de 7% em comparação com 1 hora de imersão. Na técnica de absorção de PCM-PP a vácuo a imersão durante 4 horas originou um aumento na absorção de PCM-PP menos significativa, de apenas 3% comparando com uma hora.

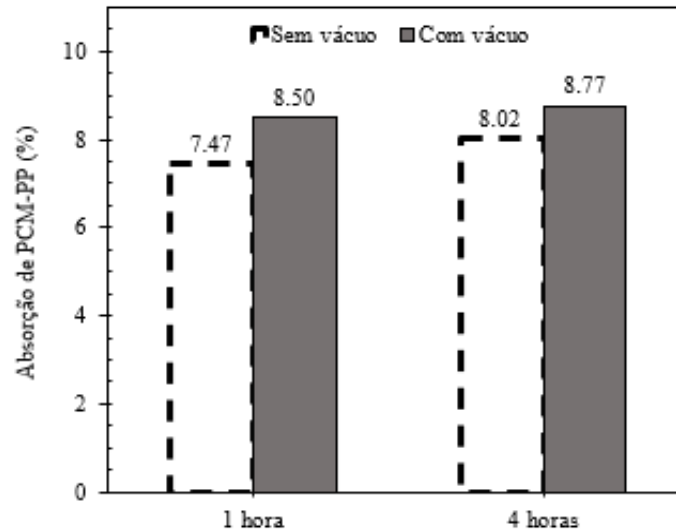


Figura 4: Os resultados de absorção de PP do RCD.



Figura 5: RCD aditivado com PP (RCD-PP) com vácuo durante 4 horas.

Composições. Foram desenvolvidas sete composições distintas de betão com diferentes teores de agregado reciclado, sendo que o agregado foi funcionalizado com PCM-PP através dois métodos descritos anteriormente. A relação de água/ligante utilizado foi de 0.55. O betão referência, apenas com incorporação de agregado natural e sem a presença de PCM-PP (REF) foi desenvolvido pelo método de Faury, de modo a obter a maior compactidade e melhor trabalhabilidade [39]. Foram ainda desenvolvidas duas composições com agregado reciclado sem incorporação de PCM-PP, com percentagens de incorporação de 40% e 80% da massa de brita (40RCD e 80RCD), duas composições com incorporação de agregado reciclado ativado com PCM à pressão atmosférica (40RCD-PP S/V e 80RCD-PP S/V) e duas composições com incorporação de agregado reciclado aditivado com PCM sob vácuo (40RCD-PP C/V e 80RCD-PP C/V). A Tabela 2 apresenta as diferentes composições de betão desenvolvidas.

Tabela 2: Dosagem do betão (kg/m³).

Misturas	Cimento	Água	Areia 0-4 mm	Brita 4-10 mm	RCD 4-10 mm	RCD-PP	PP %
REF	400	230	393	1035	-	-	0 %
40RCD	400	230	393	621	414	-	0 %
80RCD	400	230	393	207	828	-	0 %
40RCD-PP S/V	400	230	393	621	-	440	1.2 %
40RCD-PP C/V	400	230	393	621	-	446	1.5 %
80RCD-PP S/V	400	230	393	207	-	880	2.5 %
80RCD-PP C/V	400	230	393	207	-	892	3.0 %

Resultados e discussão

Abaixamento. As classes do abaixamento do betão são divididas em cinco, como definidas na norma NP EN 206-1 2007 [40]. A Figura 6 (a) apresenta os resultados do ensaio de abaixamento das todas composições de betão desenvolvidos. A incorporação de RCD no betão origina uma diminuição no seu abaixamento, provocando também a diminuição de uma ou mais classes de abaixamento.

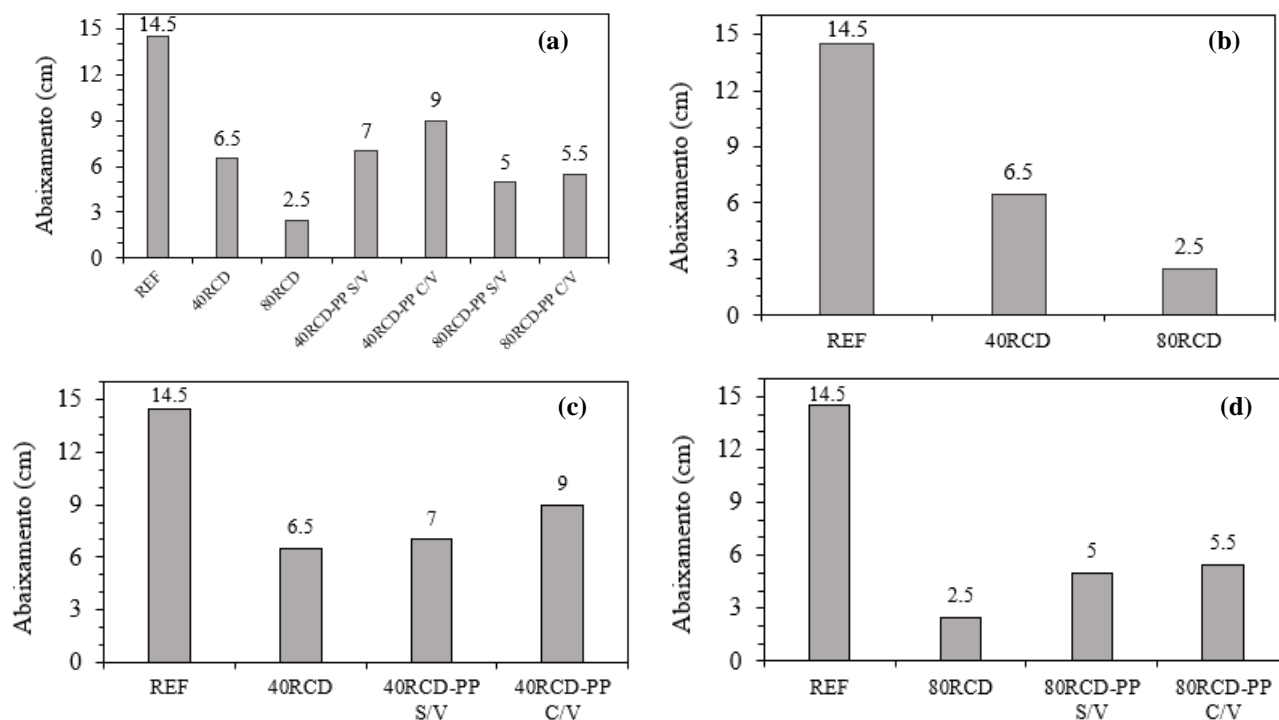


Figura 6: Abaixamento dos diferentes betões desenvolvidos.

No que diz respeito à incorporação de agregado reciclado puro, ou seja, sem incorporação de PCM-PP (Figura 6 b)), verificou-se que a incorporação de 40% de agregado reciclado originou uma diminuição no abaixamento de cerca de 55% relativamente à composição de referência, obtendo-se uma classe de abaixamento S2 (5-9 cm). Relativamente à incorporação de 80% de agregado reciclado puro verificou-se uma diminuição no abaixamento de cerca de 83%, tendo a classe de abaixamento caído 2 classes e apresentando-se como uma S1 (1-4 cm). Este comportamento pode ser justificado pela forma mais irregular e pelas pequenas partículas soltas na superfície características deste tipo de agregados.

Por outro lado, quando se efetua uma comparação com o betão com agregado reciclado puro (40RCD e 80RCD) e com agregado reciclado com incorporação de PCM por imersão à pressão atmosférica (40RCD-PP S/V e 80RCD-PP S/V) ou por vácuo (40RCD-PP C/V e 80RCD-PP C/V) (Figura 6 c) e 6 d)) foi possível verificar uma tendência para o aumento no abaixamento, originando até o aumento de uma classe de abaixamento em algumas situações. Todos os betões com incorporação de agregado reciclado com incorporação de PCM apresentam uma classe de abaixamento S2. Este comportamento pode ser justificado pelo facto que o RCD após ter sido embebido em PCM, a sua superfície fica limpa e parte da sua área fica coberta com PCM (Figura 5), o que reduz bastante o atrito entre os agregados, conseguindo-se assim este efeito de aumento do abaixamento.

Relativamente à composição com 40% de agregado reciclado (40RCD-PP S/V) e comparativamente à composição 40RCD este aumento foi de cerca de 8% e na composição com 80% de agregado reciclado (80RCD-PP S/V) comparativamente com a composição 80RCD este aumento foi de 100% (Figura 6 c) e 6d)). Por sua vez, os betões aditivados com agregado reciclado dopados com PCM por imersão a vácuo apresentam um aumento de cerca de 38% para o betão

40RCD-PP C/V comparativamente à composição 40RCD e de 120% para o betão 80RCD-PP C/V comparativamente à composição 80RCD.

Por último, efetuando uma análise comparativa entre as composições aditivadas com agregado reciclado aditivado com PCM por imersão a vácuo em relação às composições aditivadas com agregado reciclado aditivado com PCM por imersão à pressão atmosférica verificou-se que a técnica de vácuo conduziu a maiores valores de abaixamento, tendo o abaixamento aumentado cerca de 29% para as composições com 40% de agregado reciclado e cerca de 10% para as composições com cerca de 80% de agregado reciclado.

Neste trabalho, de todas as misturas de betões com agregado funcionalizado com PCM-pp, embora o betão 80RCD-PP C/V tenha incorporado a maior quantidade de PCM, o seu abaixamento ainda foi inferior o betão de 40RCD-PP S/V. Este comportamento pode ser explicado pela quantidade total de agregado reciclado incorporada ser o principal fator que afeta o abaixamento de betão fresco. No entanto, o agregado funcionalizado com PCM-PP apresenta vantagens óbvias na otimização do abaixamento do betão fresco com 80% de RCD (80RCD), o que pode aumentar o abaixamento.

Resistência à compressão. A resistência à compressão foi realizada com base na norma EN 12390-3 [41]. Inicialmente foram moldados 5 provetes cilíndricos para cada composição de betão, com dimensões de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. Foram testados dois métodos de cura, 3 provetes foram colocados em câmara húmida durante 28 dias e 2 provetes foram colocados em câmara húmida durante 21 dias e 7 dias em imersão em água.

Comparativamente com o betão de referência foi possível observar (Figura 7 a)), que o betão com incorporação de 40% e 80% de agregado reciclado não funcionalizado (40RCD e 80RCD), apresentam um aumento na resistência à compressão superior a 13% e 15%, respetivamente e independentemente da cura.

No que diz respeito à incorporação de 40% de RCD, verificou-se uma diminuição da resistência à compressão do betão 40RCD-PP S/V superior a 33% com a incorporação do agregado reciclado funcionalizado com PCM-PP (Figura 7 b)). Este comportamento pode ser justificado pela dificuldade de ligação da matriz do betão aos agregados dopados com PCM-PP, uma vez que durante o processo de imersão parte do PCM-PP envolve a superfície externa do agregado. Na Figura 7 c), o mesmo comportamento foi identificado relativamente à incorporação de 80% de agregado reciclado funcionalizado (80RCD-PP S/V), tendo-se verificado uma diminuição da resistência à compressão superior a 48%. Este comportamento é justificado pela presença de um maior teor de PCM-PP presente no agregado, o que pode dificultar em maior escala a ligação da matriz cimentícia às partículas de agregado reciclado.

A Figura 7 b) e c), apresenta a resistência à compressão obtida com diferentes técnicas de incorporação PCM-PP. Foi possível observar uma diminuição da resistência à compressão em cerca de 16% e 8%, para uma incorporação de 40% e 80% de agregado reciclado funcionalizado com PCM-PP, respetivamente. Estes resultados demonstram que o teor de incorporação de agregado reciclado de RCD funcionalizado com PCM-PP afeta negativamente a resistência à compressão do betão em qualquer das técnicas de incorporação de PCM-PP utilizadas (Figura 7 d)).

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos, independentemente do tipo de cura, sendo possível observar que os betões com incorporação de agregado reciclado sem incorporação de PCM-PP apresentam uma maior resistência comparativamente aos betões com incorporação de agregado reciclado funcionalizado com PCM-PP. Em todas as composições de betão analisadas verificou-se que na cura de betão com 21 dias em sala húmida e 7 dias imersos em água a resistência à compressão diminuiu em média cerca de 7% comparando com os betões curados 28 dias em sala húmida. O betão curado 28 dias em sala húmida apresentou a resistência à compressão prevista.

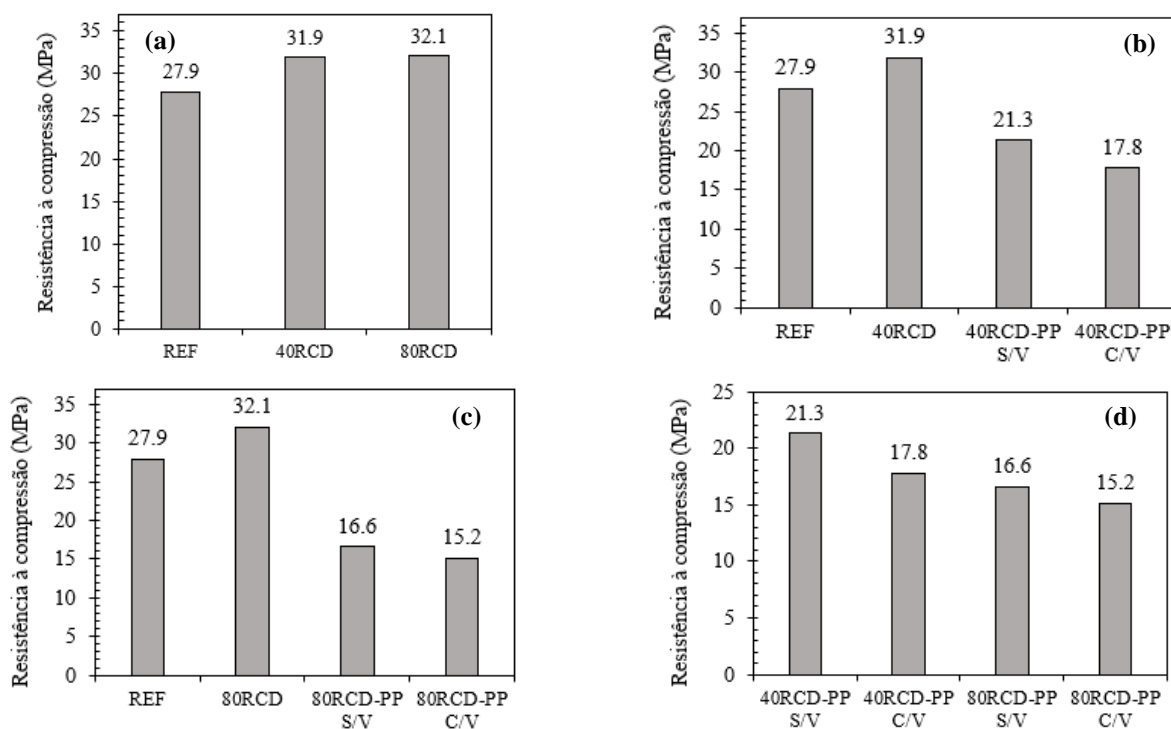


Figura 7: Resistência à compressão dos betões curados na sala húmida.

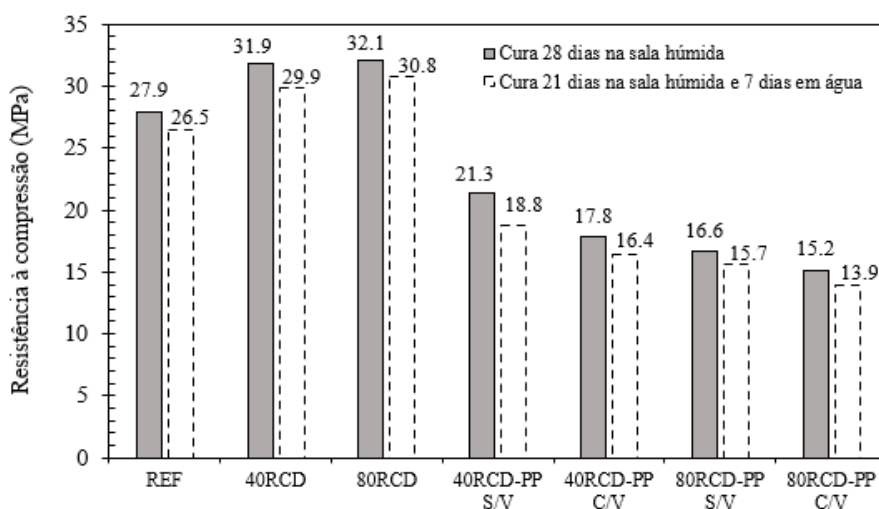


Figura 8: Resistência à compressão dos todos betões desenvolvidos.

Conclusão

Este artigo considera a tentativa de combinar o reaproveitamento de resíduos de construção e demolição como substituto do agregado natural em betões, funcionalizando-os com o material de mudança de fase. Desta forma, são abordadas três das principais temáticas, que atualmente mais preocupam os técnicos da indústria da construção, sendo esta a gestão eficiente dos recursos naturais, a gestão dos resíduos de construção e demolição e aumento da eficiência energética dos edifícios. Contudo, a incorporação de agregado reciclado funcionalizado com PCM-PP não encapsulado em betões altera as suas principais propriedades, nomeadamente o abaixamento e a resistência à compressão.

Relativamente ao processo de funcionalização do agregado reciclado foi possível concluir que apresentaram uma boa taxa de absorção de material de mudança de fase e pouca variação volúmica, independentemente do método de incorporação utilizado (pressão atmosférica e vácuo).

No que diz respeito ao abaixamento verificado nos betões desenvolvidos, a incorporação de agregado reciclado originou uma diminuição do mesmo, provocando também a diminuição de uma

ou mais classes de abaixamento. Sendo que este comportamento pode ser justificado pela forma mais irregular e pelas pequenas partículas soltas na superfície do agregado reciclado de RCD não funcionalizado e pelo facto da sua superfície do agregado funcionalizado com PCM-PP ficar coberta com PCM, reduzindo o atrito entre os agregados e os restantes constituintes do betão.

Por último, no que confere à resistência à compressão foi possível concluir os betões com incorporação de agregado reciclado funcionalizado com PCM-PP apresentam um menor desempenho, justificado pela maior dificuldade de ligação da matriz cimentícia às partículas de agregado reciclado com PCM.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), no âmbito da bolsa de doutoramento com referência UI/BD/152844/2022.

Referências

- [1] G.A. Aguilar-Hernandez, S. Deetman, S. Merciai, J.F.D. Rodrigues, A. Tukker, *Global distribution of material inflows to in-use stocks in 2011 and its implications for a circularity transition*, *Journal of Industrial Ecology*, 25 (2021) 1447–1461.
- [2] X. Zhao, R. Webber, P. Kalutara, W. Browne, J. Pienaar, *Construction and demolition waste management in Australia: A mini-review*, *Waste Management and Research*, 40 (2022) 34–46.
- [3] Y. Zhang, W. Tan, *Demolition waste recycling in China: New evidence from a demolition project for highway development*, *Waste Management and Research*, 38 (2020) 696–702.
- [4] The time of India, <https://timesofindia.indiatimes.com/business/articleshowprint/77747060.cms>, acesso em 30/09/2022.
- [5] X. Chen, C. Liu, X. Yu, *Urbanization, Economic Development, and Ecological Environment: Evidence from Provincial Panel Data in China*, *Sustainability (Switzerland)*, 14 (2022) 1–15.
- [6] World bank group, <https://data.worldbank.org/indicator/SP.URB.TOTL.IN.ZS?view=map>, acesso em 30/09/2022.
- [7] C. Zhang, M. Hu, F. Di Maio, B. Sprecher, X. Yang, A. Tukker, *An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe*, *Science of the Total Environment*, 803 (2022) 1–13.
- [8] B. Huang, X. Wang, H. Kua, Y. Geng, R. Bleischwitz, J. Ren, *Construction and demolition waste management in China through the 3R principle*, *Resources, Conservation and Recycling*, 129 (2018) 36–44.
- [9] Construction and Demolition Debris: Material-Specific Data, United States Environmental Agency, <https://www.epa.gov>, acesso em 30/09/2022.
- [10] Recovery rate of construction and demolition waste, Statistics Eurostat, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/cei_wm040/default/table?lang=en, acesso em 30/09/2022.
- [11] N. Elshaboury, A. Al-sakkaf, E.M. Abdelkader, G. Alfalah, *Construction and Demolition Waste Management Research: A Science Mapping Analysis*, *Environmental Research and Public Health*, 19 (2022) 1–25.
- [12] M. Abed, R. Nemes, B.A. Tayeh, *Journal of King Saud University – Engineering Sciences Properties of self-compacting high-strength concrete containing multiple use of recycled aggregate*, *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 32 (2020) 108–114.

- [13] B.S. Hamad, A.H. Dawi, *Case Studies in Construction Materials Sustainable normal and high strength recycled aggregate concretes using crushed tested cylinders as coarse aggregates*, *Case Studies in Construction Materials*, 7 (2020) 228–239.
- [14] V.S. Babu, A.K. Mullick, K.K. Jain, P.K. Singh, *Strength and durability characteristics of high-strength concrete with recycled aggregate- influence of processing*, *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*, 4 (2015) 55–76.
- [15] A.I. Tijani, J. Yang, S. Dirar, *Enhancing the Performance of Recycled Aggregate Concrete with Microsilica*, *International Journal of Structural and Civil Engineering Research*, 4 (2015) 347–353.
- [16] A. Australian, E. Congress, *Recycled Aggregate as Coarse Aggregate Replacement in Concrete Mixes*, *ASEAN Australian Engineering Congress 2011*, (2011) 1–9.
- [17] S. Kou, C. Poon, H. Wan, *Properties of concrete prepared with low-grade recycled aggregates C & D Waste*, *Construction and Building Materials*, 36 (2012) 881–889.
- [18] C. Zheng, C. Lou, G. Du, X. Li, Z. Liu, L. Li, *Mechanical properties of recycled concrete with demolished waste concrete aggregate and clay brick aggregate*, *Results in Physics*, 9 (2018) 1317–1322.
- [19] P. Limei, Ma; Dan, Shi; Qingbin, *Low-carbon transformation of China's energy in 2015-2050: renewable energy development and feasible path*, *China Population, Resources and Environment*, 2 (2018) 8–18.
- [20] V. V. Tyagi, K. Chopra, B. Kalidasan, A. Chauhan, U. Stritih, S. Anand, A.K. Pandey, A. Sari, R. Kothari, *Phase change material based advance solar thermal energy storage systems for building heating and cooling applications: A prospective research approach*, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 47 (2021) 1–44.
- [21] I. (CCEEE), China council for an energy-efficient economy, *Energy efficiency 2018*, Beijing, www.oecd.org/about/publishing/corrigenda.htm, acesso em 30/09/2022.
- [22] China association of building energy efficiency, *China Building Energy Research Report 2020*, (2020).
- [23] Z. Li, Y. Lu, R. Huang, J. Chang, X. Yu, R. Jiang, X. Yu, A.P. Roskilly, *Applications and technological challenges for heat recovery, storage and utilisation with latent thermal energy storage*, *Applied Energy*, 283 (2021) 1–23.
- [24] P.K.S. Rathore, N.K. Gupta, D. Yadav, S.K. Shukla, S. Kaul, *Thermal performance of the building envelope integrated with phase change material for thermal energy storage: an updated review*, *Sustainable Cities and Society*, 79 (2022) 1–28.
- [25] A.M. Matos, J.M.P.Q. Delgado, A.S. Guimarães, *Energy-Efficiency Passive Strategies for Mediterranean Climate: An Overview*, *Energies*, 15 (2022) 1–20.
- [26] P.K.S. Rathore, S.K. Shukla, *Enhanced thermophysical properties of organic PCM through shape stabilization for thermal energy storage in buildings: A state of the art review*, *Energy and Buildings*, 236 (2021) 1–29.
- [27] J. Yan, *Study on thermal management system of power battery based on phase change heat dissipation*, (2017) 160. <https://wap.cnki.net/touch/web/10358-1017073532.nh.html>, acesso em 30/09/2022.
- [28] Athienitis A.; Liu C.; Hawes D.; Banu D.; Feldman D., *Investigation of the Thermal Performance of a Passive Solar Test-Room with Wall Latent Heat Storage*, *Building and Environment*, 32 (1997) 405–410.

- [29] L. Shilei, Z. Neng, F. Guohui, *Impact of phase change wall room on indoor thermal environment in winter*, Energy and Buildings, 38 (2006) 18–24.
- [30] K. Cellat, B. Beyhan, B. Kazanci, Y. Konuklu, H. Paksoy, *Direct Incorporation of Butyl Stearate as Phase Change Material into Concrete for Energy Saving in Buildings*, Journal of Clean Energy Technologies, 5 (2017) 64–68.
- [31] L.F. Cabeza, C. Castellón, M. Nogués, M. Medrano, R. Leppers, O. Zubillaga, *Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings*, Energy and Buildings, 39 (2007) 113–119.
- [32] M. Bahrar, Z.I. Djamai, M. EL Mankibi, A. Si Larbi, M. Salvia, *Numerical and experimental study on the use of microencapsulated phase change materials (PCMs) in textile reinforced concrete panels for energy storage*, Sustainable Cities and Society, 41 (2018) 455–468.
- [33] A. Castell, I. Martorell, M. Medrano, G. Pérez, L.F. Cabeza, *Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling*, Energy and Buildings, 42 (2010) 534–540.
- [34] R. Saxena, D. Rakshit, S.C. Kaushik, *Phase change material (PCM) incorporated bricks for energy conservation in composite climate: A sustainable building solution*, Solar Energy, 183 (2019) 276–284.
- [35] K. Faraj, M. Khaled, J. Faraj, F. Hachem, C. Castelain, *Phase change material thermal energy storage systems for cooling applications in buildings: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 119 (2020) e109579.
- [36] N. Kumar, S.K. Gupta, V.K. Sharma, *Application of phase change material for thermal energy storage: An overview of recent advances*, Materials Today: Proceedings, 44 (2021) 368–375.
- [37] Instituto Português da Qualidade (IPQ), NP-581, Determinação das massas volúmicas e da absorção de água de britas e godos, (1969).
- [38] Instituto Português da Qualidade NP-954, Determinação das massas volúmicas e da absorção de água de areias, (1973).
- [39] J. Figueroa, M. Fuentealba, R. Ponce, M. Zúiga, *Effects on the Compressive Strength and Thermal Conductivity of Mass Concrete by the Replacement of Fine Aggregate by Mussel Shell Particulate*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 503 (2020) 1–10.
- [40] European Committee for Standardization (CEN), EN 206-1, Concrete - Part 1: Specification, performance, production e conformity, Concrete. (2007).
- [41] European Committee for Standardization (CEN), EN-12390-3, Hardened concrete tests, Part 3: Compressive strength of test specimens, (2003).

Desenvolvimento de compósito a base de cânhamo e bagaço de cana-de-açúcar para blocos construtivos

ZÚNIGA Arlen L. G.^{1a} e EIRES Rute M. G.^{2b}

¹ Mestrado de Construção e reabilitação Sustentável, Escola de Engenharia, Universidade de Minho, Campus de Azurém, 4800-058

² Departamento de Engenharia Civil, CTAC - Centro de Território, Ambiente e Construção, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058

^apg42609@alunos.uminho.pt, ^brute@civil.uminho.pt

Palavras-chave: Betão de Cânhamo - Bagaço de Cana de Açúcar.

Resumo. O “betão de cânhamo industrial”, muito estudado nos últimos anos, tem se tornado uma alternativa viável para as demandas atuais, sendo um material de construção com bom isolamento térmico e acústico, oferecendo a vantagem de ser uma opção mais sustentável do que o betão convencional. No entanto, uma de suas principais limitações ainda é a ausência de um traço padrão internacional que permita a sua utilização, o que acaba por afetar a sua utilização a larga escala. O bagaço de cana-de-açúcar é um resíduo agrícola disponível em grande abundância mundialmente (são produzidas cerca de 1.890.000.000 Ton./ano de cana-de-açúcar). A cana processada gera, em massa, de 25 a 30 % de bagaço de cana-de-açúcar, o que perfaz cerca de 470 milhões de toneladas por ano. Propõe-se, então, a combinação do “betão de cânhamo” com o bagaço de cana-de-açúcar, resultando num compósito híbrido. Este estudo teve como objetivo testar diferentes formulações para avaliar o seu desempenho em função das propriedades mecânicas e confirmar a integridade do novo compósito, com adição de aglutinantes como a cal hidratada, pó de tijolo e a cinza de bagaço de cana-de-açúcar. A mistura das duas fibras incrementou a resistência à compressão entre 19 a 24 %, verificando-se que o bagaço de cana preenche os espaços vazios entre as aparas de cânhamo. Relativamente à quantidade de ligante, também se confirma os resultados de outros estudos apenas com cânhamo, de melhores rendimentos com proporção 70 a 75 %, em massa, na composição.

Introdução

Nos esforços estabelecidos pela ONU para combater o aquecimento global, fica claro que a indústria da construção civil é responsável por cerca de 40 % das emissões de CO₂ produzidas por todas as atividades relacionadas ao processo construtivo [1]. Sendo necessário apresentar alternativas baseadas em princípios de sustentabilidade para a construção civil: Conservar e minimizar o consumo de recursos naturais; maximizar a reutilização de recursos; e Renovar/Reciclar desperdícios, valorizando-os em novos usos.

Essas alternativas devem contemplar não só o projeto de edificações ecológicas incorporando tecnologias passivas e ativas, mas também com a redução do uso de materiais de construção convencionais que, segundo a sua avaliação de ciclo de vida, são prejudiciais ao meio ambiente, por isso, materiais de base biológica são opções a considerar.

Entre estas opções temos o betão de cânhamo industrial (IC) sendo um “*betão agregado de celulose que utiliza o cânhamo como agregado e um aglutinante à base de cal, que pode ser chamado betão agregado de celulose*” [2]. É um material já consideravelmente estudado na construção civil, classificado como um material versátil que pode ser adaptado a uma grande variedade de aplicações, mas apenas pequenas alterações na sua composição e processo de fabricação causam muitas variações no resultado do produto, o que dificulta a sua apropriação. Na Tabela 1 apresentam-se diferentes estudos com resultados de resistência mecânica do betão de cânhamo, com a fórmula comum, cânhamo-cal. As composições estudadas pelos autores foram a base de partida para definir a composição do betão de cânhamo de referência para este estudo.

Tabela 1: Estudos de “betão de cânhamo” - resistência à compressão.

Autor	Amostra	Peso (kg/m ³)	Cânhamo (%)	Cal aérea (%)	Ligante (75% cal aérea+15% cal hidráulica+10% pozolana)	Compressão (Mpa)
Elisabete Fernandes Araújo (2015) [3]	1	113	30.00	70.00		0.60
	2	45.9	40.00	60.00		0.32
	3	57.3	35.00	65.00		0.54
	4	71	30.00	70.00		0.23
Niyigena et al (2018) [4] Cilindro de 22 cm.	C8	250	17.92		37.31	0.99
Elfordy, S., Lucas, F., Tancret, F., Scudeller, Y., Goudet,(2008) [5]	1		75.00	25.00		
Benfratello et al (2013) [6]	4-20-C	607	20.00	16.00		0.46
Gross & Walker, (2014)(48.5%de água) [7]	1	275 (seco)	19.50	32.00		0.35-0.45

Na procura de melhorar as propriedades mecânicas deste compósito, pretende-se estudar a combinação deste material com bagaço de cana-de-açúcar (BCA), seguindo o princípio de reciclagem de um material que é resíduo agrícola e dando continuidade à linha de pesquisa da dissertação sobre "Compósitos de bagaço de cana-de-açúcar para blocos construtivos", da Universidade do Minho, onde foram feitas misturas de cana-de-açúcar com cal, cinzas de cana-de-açúcar e/ou solo [8] em que se obteve, com adição de cal, 0.495 MPa de resistência máxima à compressão e 0.76 MPa à flexão. Pretende-se otimizar as propriedades de cada um dos materiais CI/BCA, num compósito híbrido onde um tem fibra curta (CI) e outro é fibra longa, mas de menor diâmetro (BCA), ver Figura 2 a e c, respetivamente.

Também é considerada a alta disponibilidade desse recurso. A produção de açúcar e os seus derivados está presente em diversos países, Figura 1, com produção média anual de 1.889.268.880 toneladas, onde o principal produtor mundial é o Brasil. Esta indústria gera uma grande abundância de resíduos, o bagaço de cana, sendo geralmente usado para a produção de energia a partir do vapor da queima do mesmo. Com o qual se obtém um segundo subproduto, a cinza do bagaço de açúcar. Esta cinza foi também usada como elemento pozolânico neste compósito híbrido.

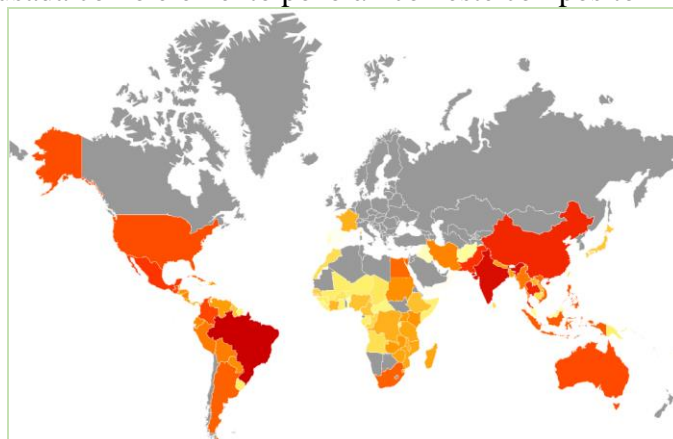


Figura 1: Principais países produtores de cana-de-açúcar fonte AtlasBig.com, 2022 [9].

Assim, o foco deste estudo é a combinação do “betão de cânhamo” com o bagaço de cana-de-açúcar, resultando num compósito híbrido. Realizaram-se diferentes formulações com adição de aglutinantes como a cal hidratada, o pó de tijolo e a cinza de bagaço de cana-de-açúcar para avaliar o seu desempenho em função das propriedades mecânicas e confirmar a integridade do novo compósito, bem como para avaliar o seu comportamento térmico.

Materiais e Métodos

Materiais. Os materiais utilizados no desenvolvimento do bloco, cujas imagens se podem ver na Figura 2, foram os componentes do “betão de cânhamo” convencional, granulado ou “aparas” de cânhamo industrial e cal, mais a adição do bagaço de cana-de-açúcar, com diferentes percentagens de adições como pó de tijolo e cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

O cânhamo utilizado foi da marca KANABAT, cultivado e processado na França, pela companhia Chanvrière de l'Aube (LCDA), não tem nenhum tratamento. O bagaço de cana-de-açúcar foi proveniente da ilha de Madeira, da variedade de Yuba, o material foi obtido pela moagem em engenho de 3 cilindros e não foi lavado. Entretanto, nunca exalou odor de fermentação e nem apresentou sabor doce. Os ligantes e adições considerados foram: a) cal aérea hidratada para a construção Lusical H100 (CL 90-S), para aplicações ou materiais de construção e engenharia civil; b) cinza de bagaço de cana-de-açúcar, produzida pela Corporação Montelimar que processa cana-de-açúcar para a produção de açúcar e mel, e através da sua central de cogeração Green Power S.A., gera eletricidade limpa a partir de biomassa, tem como resíduos a cinza de bagaço cana-de-açúcar; e c) pó de tijolo usado, como um resíduo da construção, foi o disponível no laboratório.

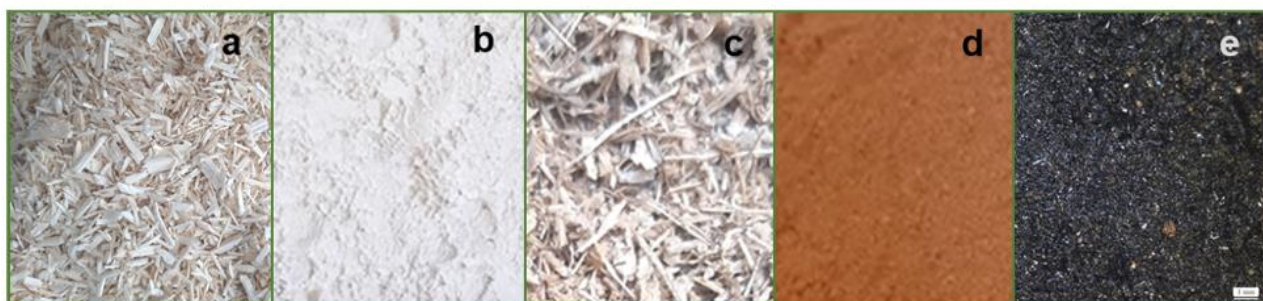


Figura 2: a. Cânhamo, b. cal, c. bagaço de cana-de-açúcar, d. pó de tijolo, e. cinza de bagaço de cana-de-açúcar.

Composição das misturas. Para selecionar as misturas de referência do betão de cânhamo consideram-se os estudos referidos na tabela 1 que indicaram melhores resultados mecânicos com o uso da cal, numa proporção cânhamo-cal de 25 – 75 % até 30 – 70 % (em massa) respetivamente. Além disso, considerou-se a tentativa de utilizar uma menor quantidade da cal, numa proporção 35 – 65 %.

Para o novo compósito de cânhamo com bagaço de cana-de-açúcar, fizeram-se as misturas descritas na tabela 2, com as mesmas percentagens da mistura de referência, mas com a particularidade da variação da percentagem dos agregados e das adições, pó de tijolo e cinza de bagaço de cana-de-açúcar, separadamente numa primeira fase. O objetivo foi o reaproveitamento de resíduos sólidos, como do processo de cogeração no caso do bagaço de cana-de-açúcar e de resíduos da construção, o pó de tijolo.

Numa segunda fase, realizaram-se misturas com o ligante e adições em combinação e por fim apenas com cal e cinza. Nesta fase foi ainda adicionado um aditivo anti fungos, o óleo de coco que segundo algumas referências tem a função de reduzir a propagação deste micro-organismos em materiais naturais [10]. Para a seleção das misturas nesta fase 2 foram escolhidas as composições que têm menor quantidade de cal, com a intenção de se orientar o estudo para o uso da menor quantidade de cal e aproveitar a cinza do BCA e o pó de tijolo.

Na última fase realizou-se uma mistura adicional no sentido de otimizar as resistências de acordo com os resultados obtidos anteriormente, combinando apenas cal e cinzas de BCA.

Mistura, moldagem e cura. Segundo as percentagens das misturas definidas, pesaram-se os diferentes materiais, misturando primeiramente a cal com água para ter uma pasta de cal, e posteriormente foram adicionados gradualmente os agregados. Em alguns casos foi preciso adicionar uma maior quantidade de água, pela quantidade do BCA e pelas diferentes adições usadas. O parâmetro determinante foi a trabalhabilidade da mistura, para garantir a coesão dos diferentes materiais que compõem as diferentes misturas. Verificou-se uma maior necessidade de água quando a quantidade do BCA é maior, como nas misturas com a percentagem de 35 %.

Tabela 2: Misturas realizadas

Fase	Mistura	Agregados (%)	Porcentagem de Agregados		Aglutinante (%)	Porcentagem de Ligante e adições			Aditivo (%)
			Cânhamo (%)	BCA (%)		Cal Hidratada	Pó de Tijolo	Cinza BCA	
Fase 1	REF CCA-1	25	25		75	75			
	REF 2 CCA -2	30	30		70	70			
	REF 3CCA-3	35	35		65	65			
	CBCACA-1	25	75	25	75	75			
	CBCACA-2	30	50	50	70	70			
	CBCACA-3	35	25	75	65	65			
	CBCAPT-1	25	75	25	75		75		
	CBCAPT-2	30	50	50	70		70		
	CBCAPT-3	35	25	75	65		65		
	CBCA-CIBCA-1	25	75	25	75			75	
CBCA-CIBCA-2	30	50	50	70			70		
CBCA-CIBCA-3	35	25	75	65			65		
Fase 2	CBCAZ-1A	30	75	25	70 (90/10)	90	5	5	5
	CBCAZ-1B	30	75	25	70 (70/30)	70	15	15	5
	CBCAZ-1C	30	75	25	70 (50/50)	50	25	25	5
	CBCAZ-2A	30	50	50	70 (90/10)	90	5	5	5
	CBCAZ-2B	30	50	50	70 (70/30)	70	15	15	5
	CBCAZ-2C	30	50	50	70 (50/50)	50	25	25	5
	CBCAZ-3A	30	25	75	70 (90/10)	90	5	5	5
	CBCAZ-3B	30	25	75	70 (70/30)	70	15	15	5
CBCAZ-3C	30	25	75	70 (50/50)	50	25	25	5	
Fase 3	CBCA-CCBCA-P1	25	75	25	75(75/25)	75		25	5

Nota: A água utilizada foi 125% da porcentagem da cal.

A média de tempo de mistura foi de 5 min: 31 s, até conseguir a trabalhabilidade da mistura.

As misturas foram colocadas em moldes de ferro, previamente tratados com óleo, com dimensões de 40x40x160 mm, e foram retirados dos moldes cerca de 24 a 48 horas depois. Foram colocados à temperatura e humidade ambiente (valores médios de 15- 30°) e cobertos com uma película de plástico para manter a humidade necessária à hidratação do ligante e adições. O tempo de cura foi de 28 dias para avaliar as propriedades mecânicas.

Resistência mecânicas à flexão e à compressão. A avaliação da resistência a flexão e à compressão realizou-se de acordo com a norma BS EN 1015-11 2019, ajustada às condições do material de origem natural, aplicando 20N/s e considerando o deslocamento da força aplicada sobre o provete como limite do teste, até à rutura do provete. Para o cálculo dos resultados considerou-se a seguinte fórmula à flexão:

$$f = 1,5 \text{ Feu/bd}^2 \quad (1)$$

F é a carga máxima aplicada ao corpo de prova, em newtons;

eu é a distância entre os rolos de suporte, em milímetros;

b é a largura do corpo de prova, em milímetros;

d é a profundidade do corpo de prova, em milímetros.

Para o cálculo dos resultados à compressão considerou-se a seguinte fórmula:

$$f = F/b \cdot d \quad (2)$$

F é a carga máxima aplicada ao corpo de prova, em newtons;

b é a largura do corpo de prova, em milímetros;

d é a profundidade do corpo de prova, em milímetros.

Propriedades térmicas. Para avaliação das propriedades térmicas do novo compósito (fluxo de calor, resistência térmica e condutibilidade térmica) utilizou-se o protótipo Prototherm, testado por Gomes [11] a metodologia seguida para este ensaio foi procedimento interno do LMC (Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, por adaptação à norma ISSO-9869-1994 [11].

O ensaio consistiu na localização de uma fonte de calor e um dissipador no extremo trapezoidal, na direção de uma seção retangular com uma largura de 60 cm. Foram dispostos sensores de temperatura, para medir a temperaturas do ambiente, fonte de calor, dissipador, canal interno Input, antes de amostra a ser testada, canal interno output depois da amostra testada. Nas amostras das diferentes misturas foi instalado um controlador de fluxo de calor. Neste ensaio foi definida na fonte de calor 200°C, para ter uma temperatura do canal interno Input de uma média de 39-40 °C constante durante 24 horas, para obter temperatura média em ambos canais e ter um intervalo de tempo onde existe estabilização do fluxo de calor. Para o cálculo desse parâmetro aplicaram-se as seguintes equações:

$$U=Q/\Delta T \quad (3)$$

Onde:

U é o coeficiente de transmissão térmica, em $W/m^2 \cdot ^\circ C$;

Q é o fluxo de calor, em W/m^2 ;

ΔT é a diferença de temperatura, em $^\circ C$.

$$U=1/R_{si}+\Sigma R_t+R_{si} \quad (4)$$

Onde:

U é o coeficiente de transmissão térmica, em $W/m^2 \cdot ^\circ C$;

R_t é a resistência térmica, em $m^2 \cdot ^\circ C/W$.

R_{si} é a resistência térmica superficial interior, em $m^2 \cdot ^\circ C/W$.

No cálculo da resistência térmica, seguiu-se a equação 5

$$R_t=e/\lambda \quad (5)$$

Onde:

R_t é a resistência térmica, em $m^2 \cdot ^\circ C/W$;

e é a espessura do material, em metros (m);

λ é a condutibilidade térmica, em $W/m \cdot ^\circ C$.

Resultados: Observações visuais – Resistência - Propriedades Térmicas

Observações visuais. Na preparação de cada mistura no estado fresco realizaram-se observações a olho nu e com recurso a microscópio ótico, no sentido de verificar a coesão ou aderência entre os materiais. Na composição do betão do cânhamo base, apenas com cal, pode-se observar a aderência da cal hidratada e o preenchimento dos espaços entre as aparas, fazendo a mistura mais coesiva. Na formação do novo compósito, as aparas do BCA, ficaram a preencher e unir as aparas do cânhamo entre elas, fazendo uma rede entre os espaços que no betão de cânhamo comum estava preenchido somente pela pasta da cal.

As misturas com maior coesão, como se pode ver na Figura 3, foram: CCA-1 (cal e cânhamo); CBCACA-1 (combinação só entre cal, cinza e bagaço de cana-de-açúcar), com melhor coesão; e CBCA-CCBCA-P1 (combinação entre cal, cinza e bagaço de cana-de-açúcar) em que a apara do cânhamo fica totalmente coberta e pode-se perceber que junto com a cinza ficam a cobrir ambas fibras.

Resistência à tração por flexão. Na Figura 4, apresentam-se os resultados obtidos, onde se pode verificar que o betão de cânhamo perde resistência com a redução da quantidade de material ligante. Comparando resultados para a percentagens iguais de ligante, verifica-se que: relativamente à adição de BCA, quando a quantidade de ligante é 75% há apenas um ligeiro aumento (5,26%) da resistência com a adição de 25% de BCA; quando a quantidade de ligante é 70%, verifica-se um aumento considerável da resistência (50%) com a adição de 50% de BCA; e quando a quantidade de ligante é 65% verifica-se uma redução na resistência de 37,5% com a adição de 75% de BCA.

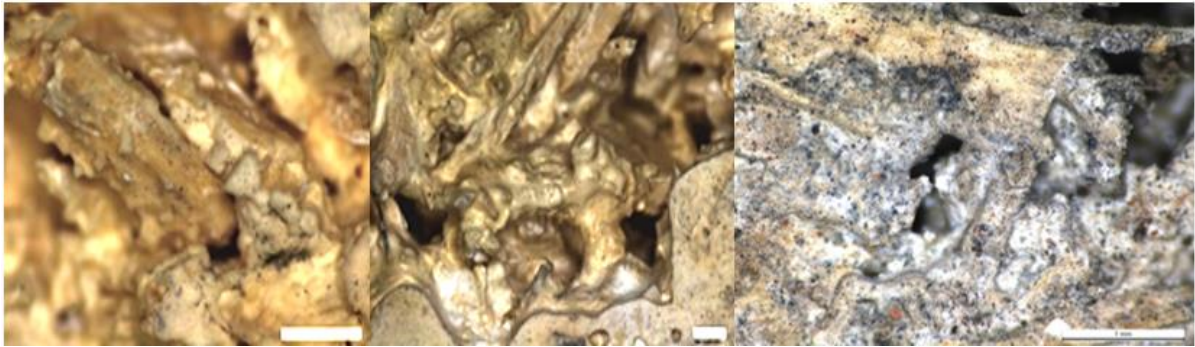


Figura 3: Microscopia ótica – Misturas: REF CCA-1; CBCACA-1; e CBCA CIBCACAL P1

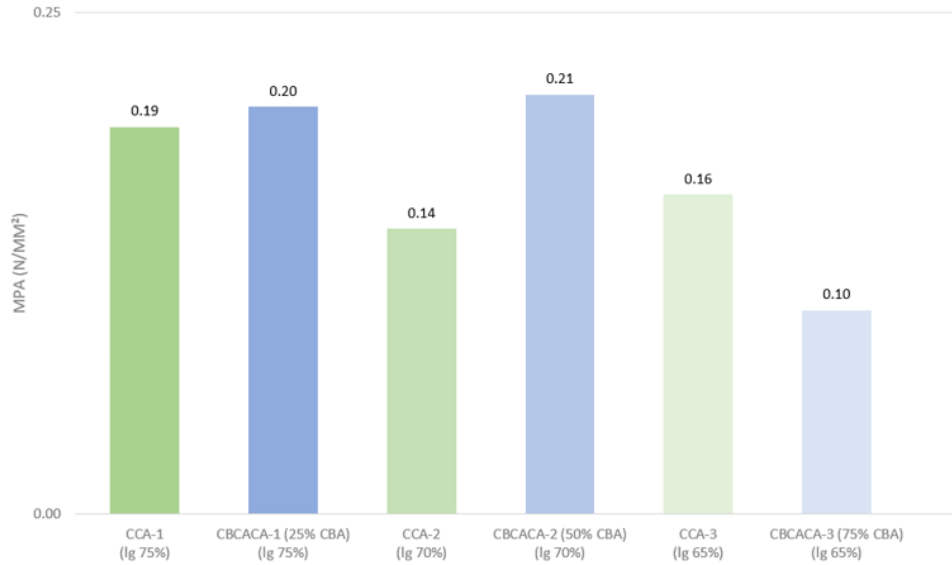


Figura 4: Resistência a flexão das misturas da fase 1

Como indicou Jami et al., pode-se comprovar que a “as resistências à flexão e à compressão também compartilham várias semelhanças, incluindo a sua dependência da composição do aglutinante, conteúdo de cânhamo e grau de compactação” [2].

Resistência à compressão. Como se observa na Figura 5, relativamente ao betão de cânhamo com diferentes quantidades de ligante, os resultados obtidos não revelam a mesma tendência decrescente, mas este facto pode dever-se a alguma diferença durante a compactação.

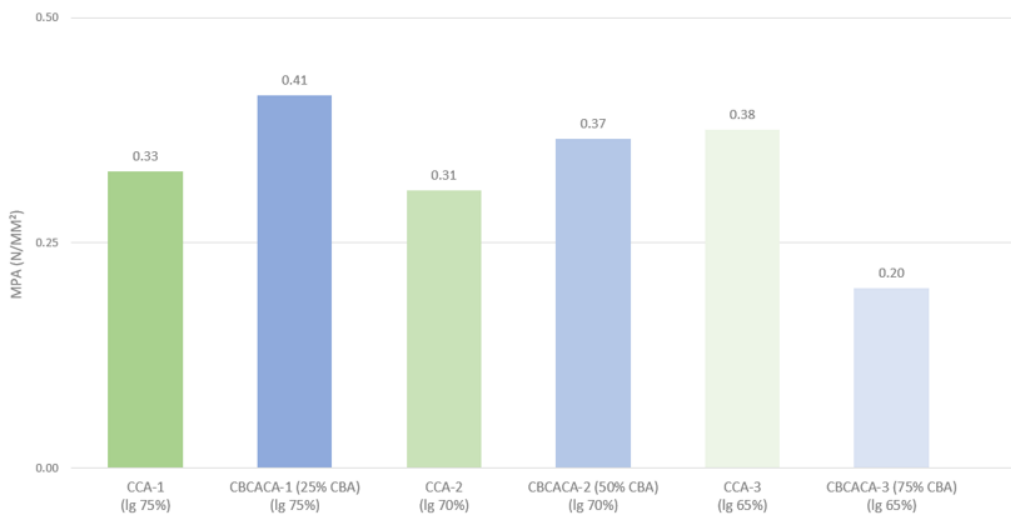


Figura 5: Resistência a compressão de CCA-CBCACA da fase 1

Comparando resultados com a adição de BCA, para a percentagens iguais de ligante, verifica-se que: quando a quantidade de ligante é 75 % existe um acréscimo de 24,24% na resistência com a

adição de 25 % de BCA; quando a quantidade de ligante é 70 % a resistência aumenta em 19,35 % com a adição de 50 % de BCA; mas, quando a quantidade é de 65 % de ligante, a adição de 75 % de BCA reduz a resistência em 47,37 %. Logo, verifica-se um comportamento semelhante ao observado na flexão, em que se verifica que a adição de 75% de BCA é prejudicial comparando com a mistura apenas com cânhamo.

Na Figura 6 apresentam-se os resultados das misturas por cada fase, Na fase 1, as misturas tendem a diminuir de força quando a quantidade de BCA é aumentada em 75 % e a quantidade de aglutinante é reduzida para 65 %.

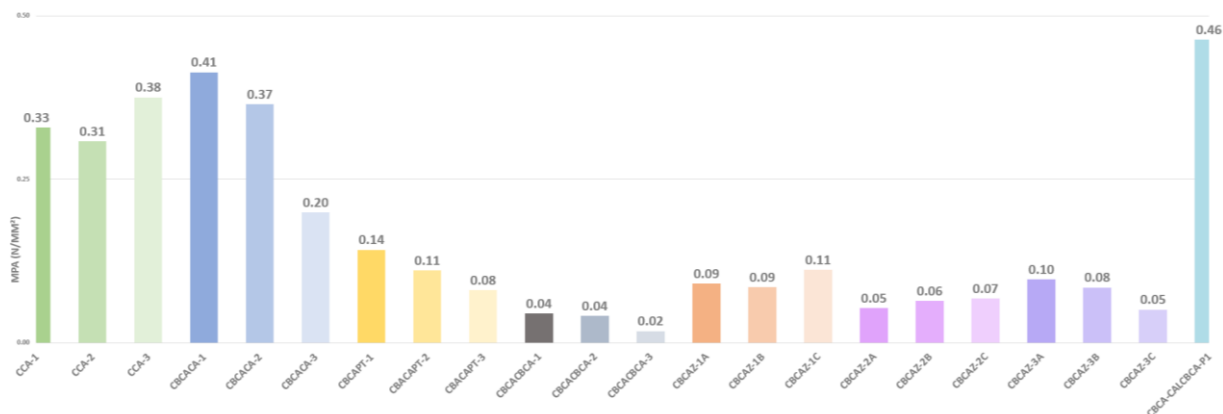


Figura 6: Resistência a compressão das misturas – Fases 1, 2 e 3

Na fase 2, os resultados não variam consideravelmente entre eles, porque se mantém a mesma percentagem de 30 % de agregados e 70 % de aglutinante, variando as quantidades de cada material de acordo com estas percentagens. Os melhores resultados são obtidos com misturas em que 75 % dos agregados são cânhamo e 25 % BCA, e no caso de aglomerantes, 70 % cal, 15 cinzas e 15 pó de tijolo.

Na fase 3, obteve-se a mistura com melhor desempenho de todas as misturas produzidas, com 25 % de agregados (25 % de BCA -75 % de cânhamo), e 75 % de ligantes (25 % de cinza de BCA e 75 % de cal) com 0,46MPa.

Comportamento térmico. Para aplicação dos testes térmicos foram utilizadas amostras de 15x15x5 cm de misturas com 25 % de agregados e 75 % de ligante. Tendo sido testada a mistura apenas com cânhamo e as misturas com cujos agregados eram compostos por 25 % de BCA e 75 % de cânhamo, uma vez que estas obtiveram um melhor desempenho no ensaio de resistência à compressão. As amostras tiveram um tempo de cura de 56 dias e um peso médio de 531,86kg/m³.

Para efeito comparativo, testou-se uma placa de poliestireno extrudido de 3 cm, para verificar os resultados com o indicado na ITE50, na Tabela 4 condutibilidades térmicas para isolantes térmicos, no caso do poliestireno extrudido a condutibilidade é de 0.037 w/m°C, neste caso, o resultado foi 0.044 w/m°C, ou seja próximo ao indicado.

Tabela 4: Valores das propriedades térmicas das misturas

Material	Fluxo de calor (w/m ²)	U (W/m ² .°C)	λ (w/m.°C)	Rt (m ² .°C/W)	ITE50 - λ (w/m.°C)	Espessura (m)
XPS	27.25	2.40	0.044	0.677	0.037	0.030
CCA 1	43.23	6.41	0.115	0.416		0.048
CBCA CA1	45.25	5.28	0.111	0.449		0.050
CBCA PT1	28.74	2.74	0.072	0.625		0.045
CBCA CIBCA 1	28.58	2.39	0.073	0.679		0.050
CBCA CIBCACAL P1	43.93	4.36	0.098	0.489		0.048

Os resultados obtidos, apresentados na Figura 7, revelam que as misturas testadas têm uma condutibilidade térmica superior ao isolamento de referência, XPS. Comparando os resultados entre misturas, pode-se verificar que as misturas sem cal, mas com as adições de pó de tijolo ou cinza de BCA tiveram a menor condutibilidade, uma média de 0.07 w/m°C. O que se poderá justificar, uma vez que foram misturas com menor aderência entre as partículas, como tal, com maior número de vazios. No caso das misturas apenas com cal, apenas com cânhamo CCA1 ou com cânhamo e BCA

CBCA CA1 tiveram valores de condutibilidade idênticos, mas superiores. A última mistura testada, da fase 3, com BCA, cânhamo, cal e cinza obteve um valor ligeiramente menor que as anteriores, o que mostra que o compósito híbrido tem um bom desempenho, seja apenas com cal ou com adição de cinza de BCA.

Comparando com o resultado de estudos encontrados na literatura sobre “betão de cânhamo” verifica-se que nas misturas à base de cal, a CCA1 e CBCA CA1 o resultado é compatível com os estudos de Evrard & Herde [12] e Evrard [13] com valores entre 0.06-0.14 w/m°C e os estudos de Dhakal [14] variando de 0,074 a 0,103 W / mK.

Comparando a mistura de BCA/Cal com a mistura idêntica de BCA e Cal (BC1) do estudo de Leão de Sousa [8], verifica-se que os valores são próximos, cujo coeficiente de condutibilidade era 0.12 W/m°C.

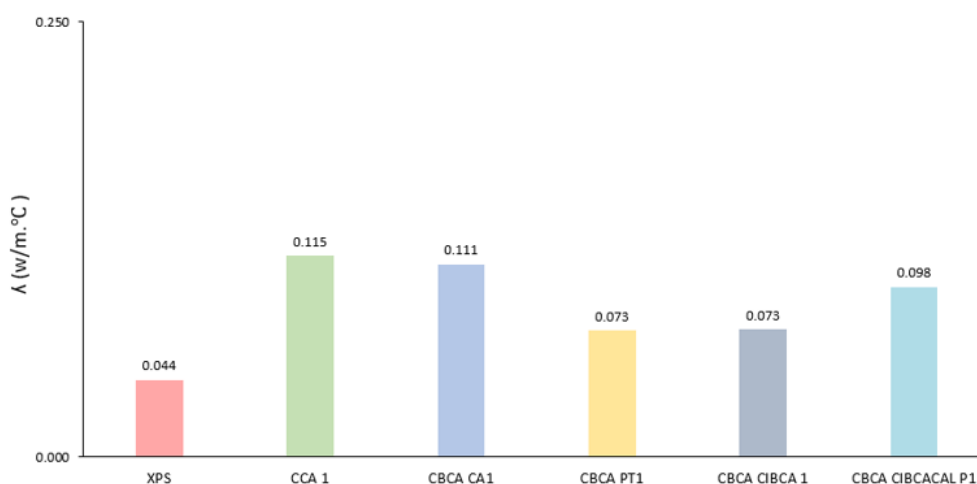


Figura 7: Condutibilidade térmica das misturas

Também se pode observar-se que, pelos resultados obtidos, nenhuma das misturas está dentro dos parâmetros para ser considerado material isolante térmico. Para tal, teria de apresentar uma condutibilidade térmica inferior a 0.065 w/m°C e uma resistência térmica superior a 0.030 m²C/w de acordo com o ITE50.

Relativamente à resistência térmica, conforme a Figura 8, todas as misturas apresentam uma boa resistência térmica, equiparada à amostra de referência (XPS) com resultados superiores aos 0.030 m²C/w. numa média de 0.533 m²C/w.

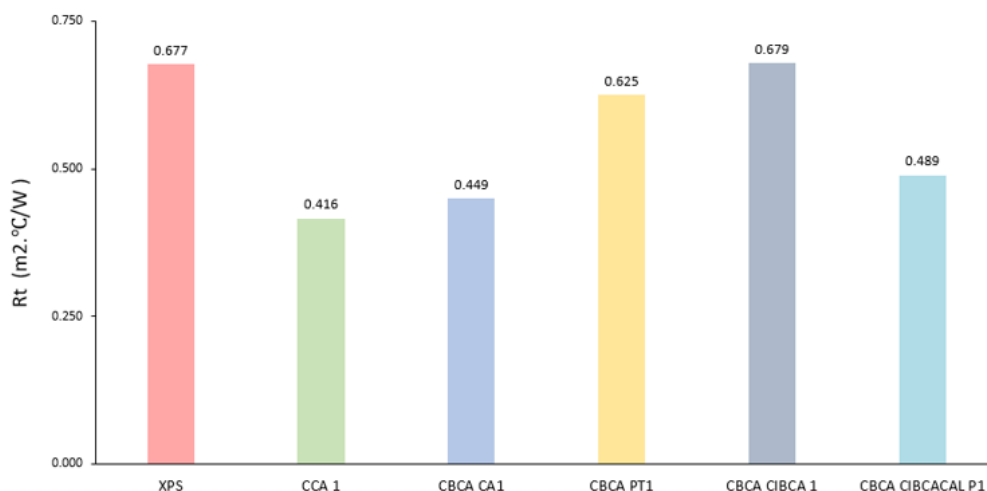


Figura 8: Resistência térmica das misturas.

Conclusão

• Quando o cânhamo é misturado apenas com a cal, as fibras estão mais afastadas umas das outras, há mais vazios, mas a cal adere totalmente às fibras de cânhamo. Pode-se observar que a mistura de cânhamo e bagaço de cana-de-açúcar preenche os espaços entre as fibras de cânhamo. Na relação de volume entre as duas fibras, o volume de bagaço é maior do que o de cânhamo na mesma percentagem.

• Quanto à proporção de água, o peso da cal foi tomado como referência para o cálculo, mas, no final, dependendo da proporção de agregados e da presença dos outros aglutinantes, foi necessário adicionar água à mistura.

• A melhor integração dos aglutinantes (cal, cinza de bagaço de cana-de-açúcar e pó de tijolo) é obtida quando são misturados a seco. Quando, num primeiro momento, foi feita a mistura da cal com água, e depois foram sendo adicionados os demais aglutinantes, notou-se que era necessário mais tempo para a mistura e que não havia uma integração total.

• Depois das experiências com todas as misturas e mediante a observação da ação dos materiais, fez-se a proposta da fórmula CBCACCBCA-P1, que consiste em Cânhamo + Bagaço de Cana-de-Açúcar + Cal + Cinza de Bagaço de Cana-de-Açúcar, na proporção de 75 % de aglutinante (cal) e 25 % de agregados (cinza de bagaço de cana-de-açúcar). Observa-se uma coesão muito maior entre todos os materiais.

• As misturas com melhor desempenho mecânico foram as que têm 25% de agregados e 75% de aglutinantes, dos agregados o 75 % de cânhamo e 25% de BCA.

• O aumento de mais do 50 % na adição do BCA diminui a resistência à compressão e flexão, assim como com a redução da percentagem do ligante, com menos de 65 %. O que confirma a uma das conclusões do estado da arte, que assinala que reduzir a percentagem da fibra e um aumentar a percentagem de ligantes, melhora a resistência mecânica.

• Relativamente aos ensaios de avaliação das propriedades térmica, comparando os resultados obtidos com os valores da literatura, pode-se concluir que o compósito híbrido (cânhamo/BCA) tem um desempenho similar, seja apenas com cal ou com adição de cinza de BCA.

Referências

- [1] Janet L., S., Jay, R., & Freyr, S. Renewables 2018-Global status report. A comprehensive annual overview of the state of renewable energy. Advancing the global renewable energy transition-Highlights of the REN21 Renewables 2018 Global Status Report in perspective (2018).
- [2] Jami, T., Karade, S. R., & Singh, L. P. *A review of the properties of hemp concrete for green building applications*, Journal of Cleaner Production, 239 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117852>
- [3] Elisabete Fernandes Araújo. *Materiais compósitos com incorporação de cânhamo industrial* Elisabete Fernandes Araújo Materiais compósitos com incorporação de cânhamo industrial (2015).
- [4] Niyigena, C., Amziane, S., & Chateaneuf, A. *Multicriteria analysis demonstrating the impact of shiv on the properties of hemp concrete*, Construction and Building Materials, 160 (2018) 211–222. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.026>
- [5] Elfordy, S., Lucas, F., Tancret, F., Scudeller, Y., Goudet, L. *Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“hemcrete”) manufactured by a spraying process*, Constr. Construir. Mater. 22 (10) 2116mi2123 (2008).
- [6] Benfratello, S., Capitano, C., Peri, G., Rizzo, G., Scaccianoce, G., & Sorrentino, G. *Thermal and structural properties of a hemp-lime biocomposite*, Construction and Building Materials, 48 (2013) 745–754. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.096>

- [7] Gross, C., & Walker, P. *Racking performance of timber studwork and hemp-lime walling*, *Construction and Building Materials*, 66 (2014) 429–435. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.05.054>
- [8] Leao de Souza, P.P. *Compósitos de bagaço de cana-de-açúcar para blocos construtivos. Dissertação de mestrado em Construções e Reabilitações Sustentáveis*, Universidade do Minho (2021). <https://hdl.handle.net/1822/75869>
- [9] AtlasBig.com Maps and Statistics of the World and Regions, disponível em <https://www.atlasbig.com/es-mx>, acessado em 2022.
- [10] Dayrit, F. M. *The Properties of Lauric Acid and Their Significance in Coconut Oil*, *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 92(1) (2015) 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11746-014-2562-7>
- [11] Gomes, F. C. F. *Placas à base de desperdícios industriais para paredes interiores*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade do Minho (2021).
- [12] Evrard, A.; Herde, A.D. Bioclimatic envelopes made of lime and hemp concrete. In *Proceedings of the CISBAT2005 Conference—Renewables in a Changing Climate—Innovation in Building Envelopes and Environmental Systems*, Lausanne, Switzerland (2005).
- [13] Evrard, A. *Transient hygrothermal behavior of Lime-Hemp Materials*. Ph.D. Thesis, Université Catholique De Louvain, Ottignies-Louvain-la-Neuve, Belgium (2008).
- [14] Dhakal, U., Berardi, U., Gorgolewski, M., & Richman, R. *Hygrothermal performance of hempcrete for Ontario (Canada) buildings*, *Journal of Cleaner Production*, 142 (2017) 3655–3664. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.102>

Comparação das Propriedades Físicas e Mecânicas de Granitos Cinza Portugueses

GONÇALVES J.¹, REIS C.^{2,3,4}, BRAGA P.^{2,4} e OLIVEIRA C.^{5,4}

¹Transgranitos – Mármore e Granitos do Alto Tâmega Lda.

² Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

³ Construct – FEUP

⁴ Construct – FEUP

¹joao.goncalves@transgranitos.pt, ²crisreis@utad.pt; plsilva@utad.pt, ⁵carlosoli@estg.ipvvc.pt

Palavras-chave: Granito, rochas ornamentais, indústria extrativa, cor, brilho.

Resumo. Portugal é um país geologicamente rico em rochas ornamentais. No norte são predominantes as concentrações de granito, no centro calcários e no sul mármore. Dada a larga variedade de granitos de cor cinza que podemos encontrar em Portugal, é imperativo o estudo destes de modo a conseguir quantificar e qualificar as diferenças destes. O objetivo deste trabalho é mostrar ao leitor diferenças de granitos cinza conhecidos internacionalmente (como o granito Branco Micaela – utilizada no Up-Site (o maior edifício de Bruxelas), o granito Pedras Salgadas – utilizada no Parlamento Europeu (Bruxelas), o granito Cinza Ariz (usada na maior praça de Klaipeda – Lituânia), granito Branco Real (utilizada na estação de Paddington em Londres) ou o granito Cinza Penalva (muito usado na arte funerária na Polónia).

Introdução

Portugal é um dos principais produtores mundiais de rochas ornamentais e, nos últimos 50 anos, esta economia sector registou um crescimento médio nacional anual de 4% [1]. Uma boa avaliação das propriedades das rochas ornamentais é de grande importância para aplicações de engenharia podendo estas condicionar ou não a utilização de rochas em determinados projetos [2]. Este trabalho pretende apresentar alguns granitos cinza portugueses, suas características e propriedades.

Materiais

Granitos Estudados. Em seguida irão ser expostas as rochas que irão ser estudadas dando a conhecer ao leitor o local onde as mesmas são extraídas, uma breve descrição macroscópica e microscópica e os principais elementos constituintes.

Branco Micaela. O granito Branco Micaela (também designado de Granito Branco Aguiar) é extraído na freguesia de Eirado, concelho de Aguiar da Beira, Distrito da Guarda. Macroscopicamente é descrito como um granito de cor cinza clara, homogéneo, ligeiramente azulado com uma granulometria fina a média. Microscopicamente é descrita como sendo uma rocha granítica com textura hipidiomórfica granular com uma leve tendência porfiroide. É constituída maioritariamente por microclina, quartzo e plagioclase, apresentando também na sua constituição (acessoricamente) moscovite, biotite+clorite, entre outros [3].

Pedras Salgadas. O granito Pedras Salgadas (também designado de Granito Cinzento de Pedras Salgadas) é extraído na freguesia de Bragado, concelho de Vila Pouca de Aguiar, Distrito de Vila Real. Macroscopicamente é descrito como um granito de cor cinza clara com uma granulometria média e de duas micas (predominante biotítico), com megacristais de feldspato dispersos. Microscopicamente é descrita como sendo uma rocha granítica com textura hipidiomórfica a xenomórfica granular. É constituída maioritariamente por microclina, plagioclase, quartzo e biotite apresentando também na sua constituição (acessoricamente) moscovite, zircão, entre outros [4].

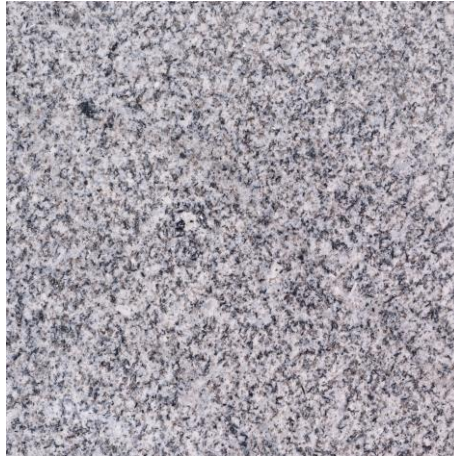


Figura 1: Amostra do Granito Branco Micaela, com o acabamento superficial polido



Figura 2: Amostra do Granito Pedras Salgadas, com o acabamento superficial polido

Cinza Ariz. O granito Cinza Ariz (também designado de Granito Zira Grey) é extraído na freguesia de Ariz, concelho de Moimenta da Beira, Distrito de Viseu. Macroscopicamente é descrito como um granito de cor cinza com uma granulometria média, de duas micas embora predominantemente biotítico, com raros megacristais de feldspato dispersos. Microscopicamente é descrita como sendo uma rocha granítica com textura xeno-hipidiomórfica granular. É constituída maioritariamente por microclina, plagioclase, quartzo e biotite apresentando também na sua constituição (acessoriamente) moscovite, ziorcão, entre outros [4].



Figura 3: Amostra do Granito Cinza Ariz, com o acabamento superficial polido

Branco Real. O granito Branco Real é extraído na freguesia de S. Tomé do Castelo, concelho e distrito de Vila Real. Macroscopicamente é descrito como um granito de cor cinza com uma granulometria média, de duas micas ou médio a grosseiro, de duas micas, com predominância da

moscovite. Microscopicamente é descrita como sendo uma rocha granítica com textura hipidiomórfica granular. É constituída maioritariamente por microclina, plagióclase, quartzo e biotite apresentando também na sua constituição (acessoriamente) moscovite, ziorcão, entre outros [4].

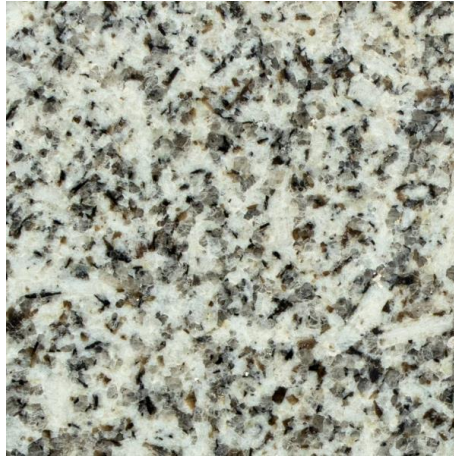


Figura 4: Amostra do Granito Branco Real, com o acabamento superficial polido

Cinza Penalva. O granito Cinza Penalva é extraído na freguesia de Sezures, concelho de Penalva do Castelo e distrito de Viseu. Macroscopicamente é descrito como um granito de granulado médio e duas micas, com cor cinzenta e tendência muito levemente porfiróide. Microscopicamente é descrita como sendo uma rocha granítica com textura hipidiomórfica granular, contendo microclina pertítica e poicilítica. É constituída maioritariamente por microclina, plagióclase, quartzo e biotite apresentando também na sua constituição (acessoriamente) moscovite, ziorcão, entre outros [4].



Figura 5: Amostra do Granito Cinza Penalva, com o acabamento superficial polido

Metodologia. De forma a estudar as diferentes características dos granitos previamente apresentados foram utilizados dados de Casal Moura et al. bem como dados públicos disponibilizados por empresas que realizam a extração e/ou transformação. São apresentadas o desempenho de várias características (Absorção de Água à Pressão Atmosférica, Resistência á Flexão, Densidade Aparente, etc.) bem como realizada uma análise e discussão dos valores.

Análise e discussão

Absorção de Água à Pressão Atmosférica. O estudo da absorção de água à pressão atmosférica é realizado utilizando a norma NP:EN:13755 - Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação da absorção de água à pressão atmosférica. O princípio deste ensaio consiste em: “Após secagem até massa constante, cada provete é pesado e seguidamente imerso em água à pressão atmosférica durante um período de tempo especificado. A absorção de água à pressão

atmosférica, expressa em percentagem é calculada através da razão entre a massa do provete saturado (após ter atingido massa constante) e a massa do provete seco” [5].

Pela análise da figura 6 pode-se concluir que o granito com mais absorção de água à pressão atmosférica é o Granito Pedras Salgadas, sendo que dos granitos estudados os que absorvem menos são o granito Cinza Ariz e o granito Cinza Penalva.

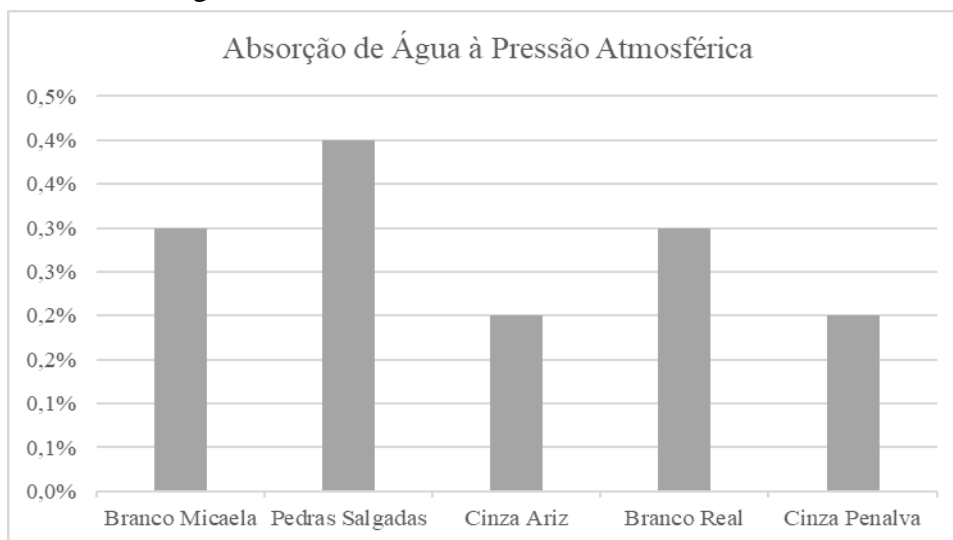


Figura 6: Absorção de Água à Pressão Atmosférica

Densidade Aparente e Porosidade Aberta. O estudo da massa volúmicas aparente e da porosidade aberta é realizado utilizando a norma NP:EN:1936 - Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação das massas volúmicas real e aparente e da porosidade total e aberta. O princípio deste ensaio consiste em: “Após secagem até massa constante, a massa volúmica aparente e a porosidade aberta são determinadas através da absorção de água sob vácuo e da pesagem de provetes imersos. A determinação da massa volúmica real e da porosidade total requiere que os provetes sejam reduzidos a pó” [6].

Pela análise da figura 7 pode-se concluir que o granito com mais densidade aparente é o Granito Cinza Penalva, sendo o granito Pedras Salgadas o que apresenta menor densidade aparente.

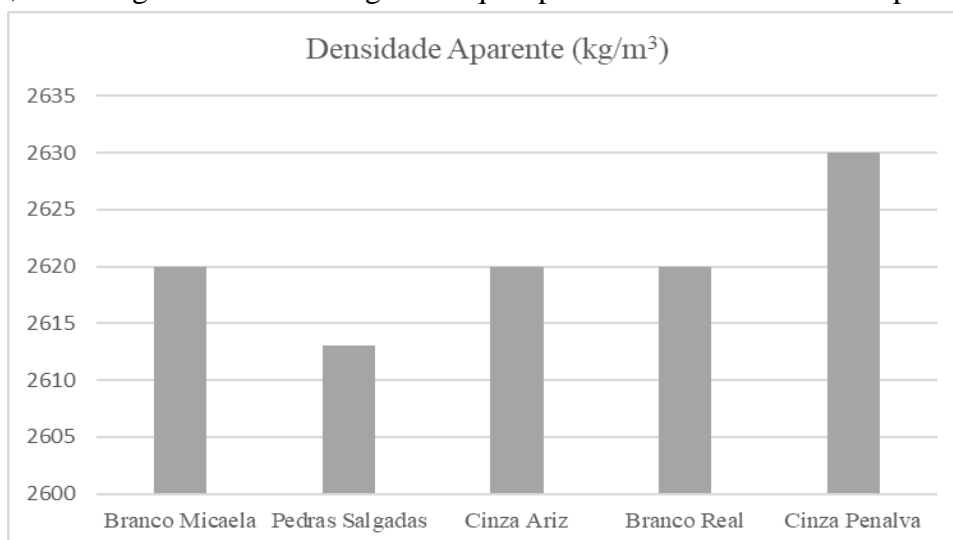


Figura 7: Densidade Aparente

Pela análise da figura 8 pode-se concluir que o granito com maior porosidade aberta é o Granito Branco Micaela, sendo os granitos Pedras Salgadas, Cinza Ariz e Cinza Pedras Salgadas os que possuem menos.

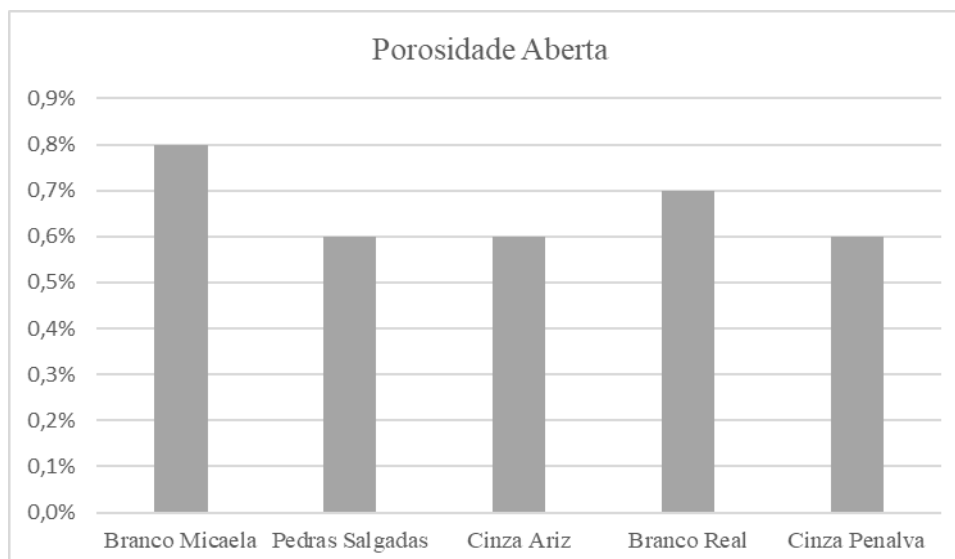


Figura 8: Porosidade Aberta

Resistência á flexão. O estudo da resistência á flexão é realizado utilizando a norma NP:EN:12372 - Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação da resistência à flexão sob carga centrada. O princípio deste ensaio consiste em: “na colocação de um provete sobre dois cilindros de apoio e na aplicação progressiva de uma força no meio do provete. É medida a força de rutura e calculada a resistência à flexão” [7].

Pela análise da figura 8 pode-se concluir que o granito com maior Resistência à Flexão é o Granito Branco Micaela, sendo que dos granitos estudados o que tem menos resistência á flexão é o granito Pedras Salgadas.

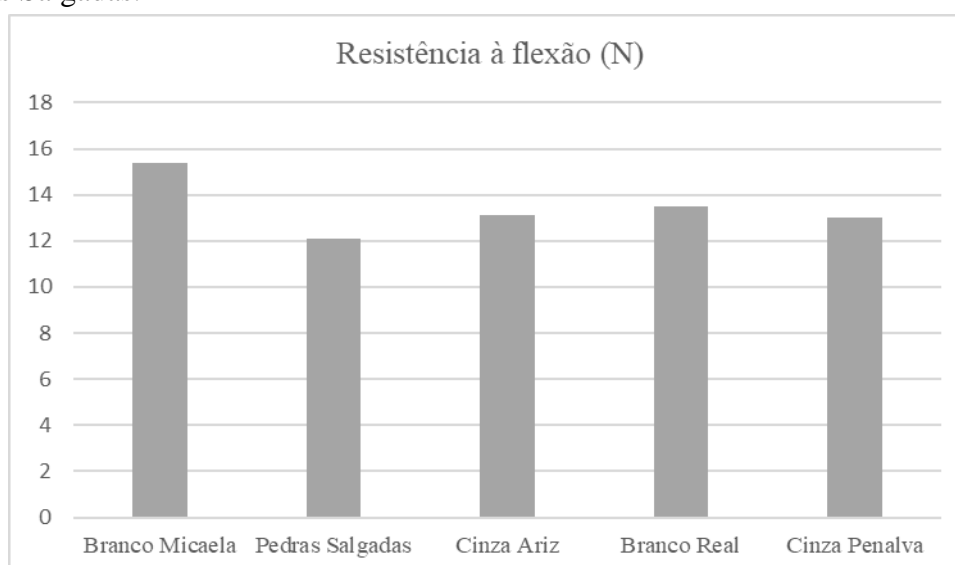


Figura 9: Resistência à Flexão

Conclusões

Dada a importância da extração e transformação de rochas ornamentais é necessário conhecer as propriedades dos diferentes materiais de modo a poder escolher melhor a utilização destes. Com este trabalho conseguimos compreender como variam algumas características presentes em granitos portugueses com a tonalidade cinza. Dos granitos selecionados é o Branco Micaela o que apresenta uma maior resistência à flexão e uma maior porosidade aberta. Em termos de densidade aparente (essencial na indústria para fazer estimativas relativas ao peso) não existem grandes variações nos granitos estudados. O granito Pedras Salgadas é o que apresenta uma maior absorção de água à pressão atmosférica.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e Financiamento programático - UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

Referências

- [1] Carvalho, J., Lopes, C., Mateus, A., Martins, L., Goulão, M. *Planning the future exploitation of ornamental stones in Portugal using a weighed multi-dimensional approach*, Resources Policy, 59 (2018) 298-317.
- [2] Ozbek, A., Gül, M., Karacan, E., Alca, O. *Anisotropy effect on strengths of metamorphic rocks*, J. Rock Mech. Geotech. Eng. 10 (2018) 164–175.
- [3] Gonçalves, J., Braga, P., Oliveira, C., Correia, J., Silva, J., Reis, C. *Contribution Evaluation of “Branco Micaela” granite used in facades, for the safety of workers*, Book-chapter #90, SHO 2019 - International Symposium on Occupational Safety and Hygiene (2019).
- [4] Casal Moura, A., Grade, J., Ramos, J. F., & Moreira, A. D. *Granitos e rochas similares de Portugal*. Porto: Instituto Geológico e Mineiro (2000).
- [5] NP: EN:13755 - Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação da absorção de água à pressão atmosférica.
- [6] NP: EN:1936 - Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação das massas volúmicas real e aparente e da porosidade total e aberta.
- [7] NP: EN:12372 - Métodos de ensaio para pedra natural - Determinação da resistência à flexão sob carga centrada.

O desafio da durabilidade na construção em altura com madeira

LIMA Daniel F.^{1, a}, BRANCO Jorge M.^{1, b} e NUNES Lina^{2, c}

¹Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, ISISE, 4800-058 Guimarães, Portugal

²Departamento de Estruturas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1700-066 Lisboa, Portugal

^adaniel.asmf.lima@gmail.com, ^bjbranco@civil.uminho.pt, ^clinanune@lnect.pt

Palavras-chave: Madeira Lamelada Cruzada, durabilidade, degradação biológica, vida útil, desenvolvimento sustentável.

Resumo. Impulsionada pelo desenvolvimento de novos produtos derivados da madeira, como é exemplo a Madeira Lamelada Cruzada (CLT), bem como pelas metas de descarbonização fixadas pelo Pacto Ecológico Europeu, a madeira retoma um importante papel no sector da construção. Há um aumento na sua utilização enquanto material estrutural, tanto no número de edifícios como no número de pisos. Porém, a durabilidade destes produtos derivados de madeira em diferentes climas ainda continua a gerar muitas questões e incertezas. A degradação biológica da madeira, causada por fungos e insetos, pode gerar danos que vão desde a estética e a redução da qualidade do ar interior, até à diminuição considerável da capacidade resistente dos elementos estruturais, implicando risco de segurança para os ocupantes, no aumento dos custos de manutenção e na redução da vida útil dos edifícios. Neste contexto, este estudo expõe os recentes avanços no estado do conhecimento no que se refere à durabilidade da construção nova de madeira, e aponta as atuais lacunas existentes, identificando a necessidade de estudos acerca da degradação biológica de produtos derivados de madeira como é exemplo o CLT, de forma a contribuir com uma utilização mais sustentável da madeira na construção.

Introdução

A criação e desenvolvimento de novos produtos derivados da madeira (*Engineered Wood Products – EWP*), como a Madeira Lamelada Colada (GLT) e a Madeira Lamelada Cruzada (CLT), possibilitou ultrapassar antigas limitações da madeira enquanto material estrutural, expandindo o seu uso na construção de edifícios tanto em número, quanto em altura. A oportunidade de um melhor aproveitamento das características mecânicas da madeira a partir dos *EWP*, bem como seu bom desempenho em termos sustentáveis, colocam-na novamente numa posição competitiva no mercado da construção [1, 2]. O potencial sustentável da madeira é demonstrado através de análises de ciclo de vida, a partir das quais Skullestad et al. [3] demonstrou reduções de emissões de gases com efeito de estufa entre 34% e 84% a partir da substituição de estruturas metálicas e estruturas de betão armado por estruturas de madeira. Portanto, os *EWP* apresentam-se como uma alternativa sustentável no setor da construção, que, atualmente, é responsável por cerca de 40% a 50% da emissão de gases com efeito de estufa a nível global [4].

EWP são produtos fabricados a partir de lamelas, laminas ou pedaços sólidos de madeira devidamente arrançados e colados com o propósito de utilização estrutural e são considerados como os produtos florestais de maior valor agregado e com significativo impacto na Bioeconomia [5, 6]. Por outro lado, a madeira como material natural, higroscópico e de origem biológica está sujeita à degradação biológica (fungos e insetos). A sua degradação pode resultar na redução da qualidade do ar interior e em danos inicialmente estéticos, mas que, em níveis mais avançados, são capazes de reduzir a sua capacidade resistente e o tempo de vida útil do elemento estrutural.

Apesar de suscetível à degradação biológica, são inúmeros os exemplos que comprovam a durabilidade elevada da madeira quando aplicada corretamente. Como exemplo, merece destaque o

templo budista *Horyu-ji*, um pagode japonês com 5 pisos (32,25 m de altura) cujos pilares em cipreste japonês (*Chamaecyparis obtusa*) possuem mais de 1400 anos [7].

A previsão do tempo de vida útil de materiais de construção é uma tarefa com elevada complexidade. Apesar da madeira ser um dos materiais de construção mais tradicionais, a durabilidade dos recentes *EWP* contra agentes de degradação biológica continua de certa forma desconhecida, devido, principalmente, à sua utilização predominante em países com invernos mais rigorosos, onde as baixas temperaturas reduzem a presença e atividade de fungos e insetos [8]. Porém, é essencial considerar a vida útil como critério de projeto, uma vez que uma vida útil prolongada implica em menores custos e na melhor performance ambiental durante o ciclo de vida completo do edifício [9, 10].

Para além da redução da capacidade resistente da madeira, a degradação biológica pode causar extensos danos económicos. Por exemplo, estima-se que as perdas ocasionadas por infestações de térmitas na Austrália seja de 1,5 bilhão de dólares por ano [11]. Adicionalmente, os *EWP* são comumente fabricados a partir de espécies que apresentam durabilidade natural relativamente baixa, como a casquinha (*Pinus silvestris*) e o espruce (*Picea abies*), recebendo tratamentos preventivos contra fungos e insetos apenas em casos de exposição ao exterior.

Este artigo tem como objetivo apresentar os principais desafios na aplicação da madeira como material estrutural para a construção de edifícios em altura considerando a sua degradação biológica em climas temperados, como é o caso de Portugal, para, assim, contribuir para a utilização de um material natural, renovável e totalmente reciclável com enormes potencialidades arquitetónicas, estruturais e construtivas.

A construção em altura com madeira

A madeira é um dos materiais de construção mais antigos utilizados pelo Homem, contudo, perdeu espaço a partir da introdução de novos materiais como o betão e o aço. Adicionalmente, a elevada desconfiança pública, gerada pela falsa perceção de ser um material com reduzida durabilidade e a ocorrência de grandes incêndios, desempenhou papel relevante na sua estagnação enquanto material estrutural, percebendo-se uma limitação quase espontânea na altura dos edifícios em madeira para um máximo de dois pisos.

Nas últimas décadas, a madeira surgiu como opção para a construção de edifícios em altura, chamando a atenção de profissionais do setor, pesquisadores e autoridades governamentais. Porém, o crescente interesse na madeira como material estrutural para edifícios em altura, apesar de trazer novas oportunidades para os *EWP*, também traz consigo muitos desafios. Neste contexto, em 2008, Smith e Frangi [12] estudaram as especificidades da construção em altura com madeira e concluíram que a madeira, recorrendo-se aos *EWP*, é capaz de desempenhar as funções estruturais de edifícios entre 10 e 20 pisos, atendendo a todos os requisitos, assim como o betão e o aço.

Em países como Canadá, Suíça, Austrália e Nova Zelândia, realizou-se a substituição dos regulamentos prescritivos, que continham critérios gerais e que não consideravam as especificidades de cada projeto, por *Building Performance Outcome (BPO)*, o que permitiu o uso da madeira em edifícios em altura sem qualquer limitação ao número de pisos, desde que fique demonstrado que o objetivo de desempenho do edifício foi alcançado.

Adicionalmente, incentivos governamentais contribuíram de forma significativa na consolidação da construção em altura em madeira em alguns países europeus. Os incentivos foram criados com o intuito de reduzir as emissões de gases com efeito de estufa e fomentar a indústria da madeira, a economia nacional e a exportação por parte dos países com reservas florestais. Para isso, recorreu-se a políticas ambientais como forma de promoção ao uso da madeira na construção, exigindo-se que a sua utilização seja considerada sempre que possível [13, 14, 15]. Podem ser citados como exemplos o *Wood First Act* [16], na Colúmbia Britânica do Canadá, a lei *Wood First* [17], no Japão e os programas suecos *Nationella träbyggnadsstrategin* e *Trästad* [18]. Como exemplo mais recente, pode-se citar a lei que obriga os novos edifícios públicos franceses a utilizarem, no mínimo, 50% dos materiais em madeira ou noutro material de origem biológica (e. g. cânhamo) [19].

Portanto, o crescente uso da madeira, tanto em número de edifícios, quanto na altura destes, é o resultado da cooperação entre indústria, institutos de pesquisa e governos, que promoveram o marketing positivo ao uso da madeira e, através dos primeiros exemplares de edifícios multipisos construídos, aumentam a confiança, percepção e interesse público acerca deste sistema [20, 21]. Atualmente, destacam-se três edifícios em altura que recorreram à madeira como elemento estrutural, são eles: o empreendimento residencial-comercial HoHo (Áustria, 2020), que possui estrutura híbrida de madeira e betão, 24 pisos e 84 metros de altura (Figura 1a) [22]; a Torre Mjøstårnet (Noruega, 2019), com 18 pisos e 85,4 metros de altura (Figura 1b) [23]; e a Torre Ascent (Estados Unidos da América, 2022), que atualmente ocupa o posto de edifício em madeira mais alto, possuindo 25 pisos e 86,6 metros de altura (Figura 1c) [24].



Figura 1: Edifícios em altura que recorreram à madeira como principal material estrutural. a) Empreendimento residencial-comercial HoHo [22]; b) Torre Mjøstårnet [23]; c) Torre Ascent [24].

Durabilidade

O crescente interesse pela utilização da madeira como material estrutural para edifícios em altura é uma grande oportunidade para o setor madeireiro, mas traz consigo uma série de desafios a serem vencidos. Entre eles, a resistência ao fogo e o controle de umidade, o último com impacto direto na degradação biológica da madeira e, conseqüentemente, na durabilidade desta tipologia de construção em diferentes climas.

A madeira é um material natural e com comportamento higroscópico, absorvendo ou liberando umidade de acordo com as condições ambientais no qual está inserido e a sua durabilidade é intrinsecamente relacionada com o seu teor de água, uma vez que os agentes biológicos que podem causar maiores danos à madeira necessitam da presença de umidade.

Para a colonização de fungos na madeira, é necessário que uma série de fatores ocorra em simultâneo e por um certo período de tempo, como o teor de água acima dos 20%-30%, presença de oxigênio e temperaturas favoráveis. Relativamente às térmitas subterrâneas, estas formam ninhos no subsolo, constantemente à procura de uma fonte de alimento (madeira) através de galerias construídas com solo húmido e partículas fecais e, apesar de serem capazes de infestar madeiras com teores de água reduzidos, possuem preferência por madeiras húmidas (acima de 20%) [25].

As normas EN 350 [26] e EN 335 [27] tratam a durabilidade de estruturas de madeira em termos da durabilidade natural da espécie, da sua impregnabilidade e da classe de risco no qual a estrutura estará exposta em serviço. A durabilidade natural é definida como a resistência de uma espécie frente aos principais agentes de degradação (fungos, térmitas e carunchos) [26], existindo um sistema de classificação para cada um destes agentes de forma independente. Relativamente à impregnabilidade, a EN 350 [26] define a facilidade com que a espécie absorve os tratamentos preservativos a ela submetidos.

O Quadro 1 apresenta as classificações de durabilidade natural e impregnabilidade das duas espécies que, atualmente, são as mais correntes na produção dos dois principais EWP empregados para fins estruturais: CLT e GLT.

Quadro 1: Classificação de durabilidade natural e impregnabilidade para a Casquinha e o Abeto [26].

Casquinha (<i>Pinus sylvestris</i>)		
Durabilidade natural		
	Borne	Cerne
Fungos	Não durável	Moderadamente / pouco durável
Térmitas subterrâneas	Suscetível	Suscetível
Carunchos	<i>Anobium punctatum</i>	Durável
	<i>Hylotrupes bajulus</i>	Durável
Impregnabilidade		
	Borne	Cerne
	Facilmente impregnável	Difícilmente/Não impregnável
Espruce (<i>Picea abies</i>)		
Durabilidade natural		
	Borne	Cerne
Fungos	Não durável	Pouco durável
Térmitas subterrâneas	Suscetível	Suscetível
Carunchos	<i>Anobium punctatum</i>	Suscetível
	<i>Hylotrupes bajulus</i>	Suscetível
Impregnabilidade		
	Borne	Cerne
	Difícilmente impregnável	Difícilmente/Não impregnável

Relativamente às classes de risco, essas são definidas pela EN 335 [27] de acordo com o ambiente de exposição ao qual a madeira está sujeita e que podem tornar a madeira ou derivado suscetível ao ataque biológico. A EN 335 [27] define cinco classes de risco, onde a classe 1 engloba as madeiras ou derivados que estão localizados no interior (não exposto à chuva), em outras palavras, com teor de água sempre abaixo de 20%. Por sua vez, a classe de risco 2 engloba madeiras e derivados cobertos (sem exposição à chuva), mas com risco de humedificações ocasionais (teor de água ocasionalmente acima de 20%). Portanto, as madeiras e derivados classificados nas classes de risco 1 e 2 possuem risco reduzido de ocorrência de degradação biológica.

Atualmente, a única norma europeia existente aplicável ao CLT é a EN 16351 [28], que considera a utilização deste produto apenas para as classes de risco 1 e 2. Por outro lado, apesar do GLT não possuir restrições quanto à classe de risco, o seu uso mais recorrente é nas classes de risco 1 e 2. A utilização destes dois produtos para essas classes de risco é condizente com as espécies utilizadas para a sua produção, uma vez que é possível inferir através do Quadro 1 que são espécies com durabilidade natural relativamente baixas e que apresentam dificuldade na absorção de tratamentos preservativos (com exceção do borne da Casquinha).

Em teoria, os edifícios em altura com estrutura em madeira, que usualmente restringem a utilização do CLT e GLT às classes de risco 1 e 2, apresentam risco muito baixo de sofrerem degradações graves por agentes biológicos. Porém, ao considerar que a patologia mais recorrente nos edifícios é a presença e proliferação de humidade (e. g. infiltração de água da chuva, canos partidos, humidade ascensional proveniente do solo, entre outras), tornam-se frequentes os relatos de estruturas de madeira inicialmente projetadas para uma classe de risco 1 ou 2 estarem em serviço na classe de risco 3, aumentando consideravelmente o risco de deterioração destes elementos.

O teor de água da madeira é considerado o parâmetro mais relevante na previsão do tempo de vida de serviço de uma estrutura em madeira, em conjunto com o microclima no qual ela está inserida (temperatura e humidade relativa do ar). Atualmente, existem modelos numéricos de degradação por fungos de podridão (e. g. [29]) que usam como dados de entradas esses parâmetros.

Porém, Gaspari et al. [30] alertam que, apesar da durabilidade da madeira estar bem estudada a nível de material, poucos investigadores estudaram a previsão da degradação a nível estrutural. Portanto, para o controle da deterioração, a monitorização do teor de água e das condições de exposição, associados com a correta manutenção periódica, é vista como alternativa para os tratamentos químicos preservativos para madeira, que são cada vez mais limitados devido as regulamentações ambientais, que são cada dia mais rigorosas [31, 32].

Estado do conhecimento

Devido ao seu papel relevante na degradação e no comportamento a longo prazo da madeira, a água é tema de destaque na quase totalidade dos estudos publicados sobre a durabilidade das estruturas em madeira. Numa primeira fase, investigadores dedicaram-se ao estudo da água na madeira em um nível microscópico (e. g. [33, 34]), desenvolvendo modelos numéricos preditivos que, posteriormente, com o desenvolvimento de softwares de análises por elementos finitos, foram utilizados como base para modelos em escalas maiores com o objetivo de simular o transporte e distribuição da água no interior de elementos de madeira (e. g. [35, 36]). O estudo da dinâmica da água no interior de elementos de madeira torna-se ainda mais relevante nas construções novas recorrendo-se aos *EWP*, uma vez que se diferenciam do *timber-frame* tradicional pelo volume de madeira e a sua capacidade de absorver maiores quantidades de água, além de apresentar secagem mais lenta e zonas de acúmulo de água nas lamelas mais internas dos CLT e GLT [37].

De forma a avaliar os efeitos da degradação nas estruturas de madeira, investigadores recorrem a dois tipos de ensaios: os de degradação acelerada e os de exposição. Os ensaios de degradação acelerada, geralmente, são baseados em ciclos de molhagem e secagem possuindo a vantagem de serem realizados em ambiente controlado e em menor tempo. Wang et al. [38], em sua revisão da literatura, apresentam um resumo dos métodos normalizados existentes atualmente para ensaios de degradação acelerada, mas alertam que, apesar das vantagens apresentadas por esses ensaios, a correlação dos seus resultados com elementos de madeira em condições reais de serviço é complexa e imprecisa. Adicionalmente, nota-se a falta de métodos normalizados para ensaios de degradação em elementos com dimensões estruturais que representem condições reais de deterioração das estruturas, uma vez que os métodos normalizados existentes abordam apenas ensaios em provetes de pequenas dimensões [8].

Neste contexto, Schmidt et al. [39] conduziram um estudo em que expuseram painéis CLT à ciclos de molhagem e secagem em ambiente controlado (câmara climática) e relataram maiores concentrações de água na camada intermédia dos painéis. Apesar das camadas exteriores apresentarem secagem rápida, as camadas intermédias secaram de forma muito mais lenta, gerando gradientes de humidade mais acentuados que resultaram em fendas internas de secagem e delaminações.

Relativamente às ligações entre elementos estruturais, elas desempenham papel crítico quando se trata de estruturas de madeira. Sinha et al. [40] ressaltam a falta de documentos com diretrizes e orientações quanto aos métodos de ensaios e parâmetros a serem analisados na avaliação destas ligações. Adicionalmente, Sinha et al. [40] propõem duas metodologias de ensaios de degradação acelerada de ligações entre painéis CLT por fungos de podridão.

A maneira mais assertiva de atingir as condições reais de degradação de estruturas de madeira é através da realização de ensaios de exposição natural. Em contrapartida, são ensaios que requerem uma quantidade de tempo elevada para serem executados, além da necessidade da monitorização dos parâmetros a serem analisados durante todo o período de exposição, que pode levar anos. Adicionalmente, os resultados dos ensaios de exposição são limitados à localização geográfica onde foram executados ou de regiões com condições climáticas semelhantes.

Apesar dos ensaios de exposição de elementos de madeira já terem sido amplamente estudados, adotou-se, maioritariamente, a exposição direta dos elementos de madeira ao exterior (e. g. [41, 42]), o que não representa as condições de exposição usualmente adotadas para os *EWP*, uma vez que são elementos estruturais comumente protegidos da ação direta das intempéries [40].

Conclui-se, portanto, que, apesar da durabilidade da madeira já ter sido largamente investigada, os métodos tradicionais não se aplicam de maneira precisa quando se referem às novas estruturas em madeira utilizadas nos edifícios em altura, sinalizando a necessidade de desenvolver o conhecimento acerca do comportamento a longo prazo destes novos produtos, além de estabelecer métodos normalizados de ensaios específicos para suas condições reais de serviço.

Conclusões

A madeira, um material natural, renovável, sequestrador de carbono e com características mecânicas que favorecem a sua utilização como material estrutural (material com elevada resistência comparada com a sua reduzida massa volúmica), ressurge como alternativa aos materiais convencionais do sector da construção, como o betão e o aço. Em consequência, é notório o aumento do número de edifícios com estruturas de madeira e, por outro lado, o número de pisos desses novos edifícios de madeira. Por outro lado, a sua anisotropia, heterogeneidade, elevada variabilidade em termos de espécies e produtos, que possuem características singulares, e a sua origem natural e biológica, que torna a madeira sujeita à degradação biológica, tornam necessários conhecimentos técnicos e científicos para a correta utilização da madeira, pois, apesar de possuir elevada complexidade, quando aplicada da forma correta e com a devida proteção e manutenção, é um dos materiais de construção mais eficientes.

A durabilidade desta tipologia de construção em países com climas temperados, como é o caso de Portugal, ainda é limitada e, ao considerar que uma vida útil prolongada de uma construção representa uma melhor performance em termos ambientais e menores custos de ciclo de vida, o melhor entendimento acerca dos processos de degradação e seus impactos na estrutura são cruciais para a implementação bem sucedida em locais com pouca tradição na construção com estruturas de madeira e elevada desconfiança pública.

Portanto, torna-se necessário investir na monitorização destes edifícios para identificar as condições que ativam o processo de degradação de forma prematura e com tempo hábil para se traçar o melhor plano de manutenção periódica. Adicionalmente, ressalta-se a escassez de métodos normalizados, documentos técnicos e diretrizes específicas para os novos produtos, como o CLT, uma vez que os métodos tradicionais se mostram ineficazes em representar de forma precisa o seu comportamento a longo prazo.

Agradecimentos

Este trabalho recebeu financiamento da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia através de uma bolsa de doutoramento (PRT/BD/152833/2021) concedida ao primeiro autor pelo programa MIT Portugal.

Referências

- [1] Woodard, A.C., and H.R. Milner, Sustainability of timber and wood in construction, In *Sustainability of Construction Materials*. Elsevier (2016) 129–157.
- [2] Stocchero, A., J.K. Seadon, R. Falshaw, and M. Edwards, *Urban Equilibrium for sustainable cities and the contribution of timber buildings to balance urban carbon emissions: A New Zealand case study*, Journal of Cleaner Production, 143 (2017) 1001–1010.
- [3] Skullestad, J.L., R.A. Bohne, and J. Lohne, *High-rise Timber Buildings as a Climate Change Mitigation Measure – A Comparative LCA of Structural System Alternatives*, Energy Procedia, 96 (2016)112–123.
- [4] Abd Rashid, A.F., and S. Yusoff, *A review of life cycle assessment method for building industry*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45, 2015, pp. 244–248.

- [5] Lam, F., *Modern structural wood products*, Progress in Structural Engineering and Materials, 3(3) (2001) 238–245.
- [6] Ramage, M.H., H. Burrige, M. Busse-Wicher, et al., *The wood from the trees: The use of timber in construction*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 68 (2017) 333–359.
- [7] Smith, I., and A. Frangi, *Use of timber in tall multi-storey buildings*, Zurich (2014).
- [8] Cappellazzi, J., M.J. Konkler, A. Sinha, and J.J. Morrell, *Potential for decay in mass timber elements: A review of the risks and identifying possible solutions*, Wood Material Science & Engineering 15(6) (2020) 351–360.
- [9] Prieto, A.J., and A. Silva, *Service life prediction and environmental exposure conditions of timber claddings in South Chile*, Building Research & Information 48(2) (2020) 191–206.
- [10] Riggio, M., N. Alhariri, and E. Hansen, *Paths of innovation and knowledge management in timber construction in North America: a focus on water control design strategies in CLT building enclosures*, Architectural Engineering and Design Management 16(1) (2020) 58–83.
- [11] Govorushko, S., *Economic and ecological importance of termites: A global review*, Entomological Science 22(1) (2019) 21–35.
- [12] Smith, I., and A. Frangi, *Tall Timber Buildings: Introduction*, Structural Engineering International 18(2) (2008) 114–114.
- [13] Kremer, P.D., and M.A. Symmons, *Mass timber construction as an alternative to concrete and steel in the Australia building industry: A PESTEL evaluation of the potential*, International Wood Products Journal, 6 (2015) 138–147.
- [14] Xia, B., T. O’Neill, J. Zuo, M. Skitmore, and Q. Chen, *Perceived obstacles to multi-storey timber-frame construction: An Australian study*, Architectural Science Review 57(3) (2014). 169–176.
- [15] Klas, R., and H. Jonsson, *Prospects for timber frame in multi-storey house building in*, (2009).
- [16] *Wood first act*, British Columbia, Victoria (2009).
- [17] *Assessing the impact of the Japanese wood first act on demand for PFC in the public non-residential market in Japan* (2012).
- [18] Mahapatra, K., and L. Gustavsson, *Multi-storey timber buildings: Breaking industry path dependency*, Building Research and Information 36(6) (2008) 638–648.
- [19] English, J., *French government to require 50% timber in all new public buildings from 2022*, International Forest Industries (2020).
- [20] Mahapatra, K., and L. Gustavsson, *Multi-storey timber buildings: Breaking industry path dependency*, Building Research and Information 36(6) (2008) 638–648.
- [21] Shmuely-Kagami, T., and S. Matsumura, *Progress of Timber Multi-Storey Apartment Building in Europe and Japan*, n Proceedings of the 10th World Conference on Timber Engineering, Curran Associates Inc. (2008) 21–28.
- [22] “HoHo Wien”, <https://www.hoho-wien.at/>.
- [23] “Mjøstårnet”, <https://www.moelven.com/mjostarnet/>.
- [24] “Ascent”, <https://www.kaa-arch.com/php/page-projectLoader.php?project=135>.
- [25] Verbist, M., L. Nunes, D. Jones, and J.M. Branco, *Service life design of timber structures*, In Long-term Performance and Durability of Masonry Structures. Elsevier (2019) 311–336.
- [26] EN 350. Durability of Wood and Wood-Based Products. Testing and Classification of the Durability to Biological Agents of Wood and Wood-Based Materials (2016).

- [27] EN 335. Durability of Wood and Wood-Based Products. Use Classes: Definitions, Application to Solid Wood and Wood-based Products, (2013).
- [28] EN 16351. Timber structures - Cross laminated timber – Requirements (2015).
- [29] Brischke, C., and L. Meyer-Veltrup, *Modelling timber decay caused by brown rot fungi*, Materials and Structures/Materiaux et Constructions 49(8) (2016) 3281–3291.
- [30] Gaspari, A., I. Giongo, and M. Piazza, A Risk-Based Approach for Quantifying Durability and Life-Expectancy of the Wall-Foundation Construction Detail in Timber Buildings, In Current Topics and Trends on Durability of Building Materials and Components - Proceedings of the 15th International Conference on Durability of Building Materials and Components, DBMC 2020, International Center for Numerical Methods in Engineering (2020) 1877–1884.
- [31] Palma, P., and R. Steiger, Structural health monitoring of timber structures – Review of available methods and case studies, Construction and Building Materials, 248 (2020).
- [32] Broda, M., Natural compounds for wood protection against fungi—A review, Molecules, 25 (2020).
- [33] Santoni, I., and B. Pizzo, Effect of surface conditions related to machining and air exposure on wettability of different Mediterranean wood species, International Journal of Adhesion and Adhesives, 31(7) (2011) 743–753.
- [34] Greil, P., T. Lifka, and A. Kaindl, *Biomorphic Cellular Silicon Carbide Ceramics from Wood: I. Processing and Microstructure*, Journal of the European Ceramic Society 18(14) (1998) 1961–1973.
- [35] Autengruber, M., M. Lukacevic, and J. Füssl, Finite-element-based moisture transport model for wood including free water above the fiber saturation point, International Journal of Heat and Mass Transfer, 161 (2020).
- [36] Eitelberger, J., and K. Hofstetter, *Prediction of transport properties of wood below the fiber saturation point – A multiscale homogenization approach and its experimental validation. Part II: Steady state moisture diffusion coefficient*, Composites Science and Technology, 71(2) (2011) 145–151.
- [37] Riggio, M., M. Mrissa, M. Krész, J. Včelák, J. Sandak, and A. Sandak, Leveraging Structural Health Monitoring Data Through Avatars to Extend the Service Life of Mass Timber Buildings, Frontiers in Built Environment, 8 (2022).
- [38] Wang, J., X. Cao, and H. Liu, A review of the long-term effects of humidity on the mechanical properties of wood and wood-based products, European Journal of Wood and Wood Products, 79 (2021) 245–259.
- [39] Schmidt, E.L., M. Riggio, A.R. Barbosa, and I. Mugabo, *Environmental response of a CLT floor panel: Lessons for moisture management and monitoring of mass timber buildings*, Building and Environment, 148 (2019) 609–622.
- [40] Sinha, A., K.E. Udele, J. Cappellazzi, and J.J. Morrell, *A Method to Characterize Biological Degradation of Mass Timber Connections*, Wood and Fiber Science, 52(4) (2020) 419–430.
- [41] Brischke, C., and A.O. Rapp, Dose–response relationships between wood moisture content, wood temperature and fungal decay determined for 23 European field test sites, Wood Science and Technology, 42(6) (2008) 507–518.
- [42] Jermer, J., and S.P. Träteke, *WoodExter - Service life and performance of exterior wood above ground - Final report*, SP Technical Research Institute of Sweden SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut SP (2011) 53.

CAPÍTULO 2

FÍSICA DAS CONSTRUÇÕES

Do Levantamento com Drones à Simulação Energética – Um Caso de Estudo

DELGADO João M.P.Q.^{1,a}, GUIMARÃES Ana S.^{1,b}, MARTINS João P. Poças^{1,c}, PARRACHO Diogo^{1,d} e RODRIGUES L.^{2,e}

¹ CONSTRUCT, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n; 4200-465 Porto, Portugal

² ALiCE - Laboratório Associado em Engenharia Química, Departamento Eng. Química, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n; 4200-465 Porto, Portugal

^ajdeldgado@fe.up.pt, ^banasofia@fe.up.pt, ^cjmpm@fe.up.pt, ^ddfrrparracho@fe.up.pt, ^elrodrigues@fe.up.pt

Palavras-chave: Higrotérmica, BIM, BEM, Levantamento Fotogramétrico, Construção Sustentável, Simulação Energética, UAS/drones.

Resumo. A modelação de informações da construção (BIM) é o primeiro passo para a implementação da construção 4.0, em que a realidade virtual e os gêmeos digitais são elementos-chave. A utilização de veículos aéreos não tripulados (UAS/drones) para a captação de dados de edifícios é hoje em dia um método bastante popular, pelo que foi desenvolvida uma metodologia que integrasse digitalmente os levantamentos fotogramétricos de um edifício em BIM, exclusivamente com a utilização de UAS/drones. Atualmente, os edifícios são responsáveis por 40% do consumo de energia na Europa e, por isso, a interligação entre BIM e os modelos energéticos de edifícios (BEM) é fundamental para digitalizar o sector da construção, aumentando a competitividade através da redução de custos. Nesse contexto, o Projeto BlueWoodenHouse visa, entre outras atividades, caracterizar as soluções/sistemas de materiais de construção e monitorizar a temperatura, humidade relativa e CO₂, bem como os consumos energéticos, de uma casa unifamiliar modular em madeira, localizada no norte de Portugal, com 190 m² e três utilizadores. Assim, os resultados experimentais de monitorização servirão para validar o modelo numérico desenvolvido no simulador DesignBuilder que contempla os dados das características geométricas em 3D e a medição das condições térmicas da sua envolvente obtidos por UAS/drones.

Introdução

Nos países mais desenvolvidos e em particular na Europa, cerca de 90% do tempo é passado pelas pessoas em ambientes fechados, maioritariamente em casa. Este valor tenderá a aumentar com o aumento do teletrabalho, tal como preconizam as sugestões da União Europeia [1]. Assim, os edifícios residenciais cada vez mais são locais de habitação e trabalho, pelo que devem apresentar requisitos de qualidade do ar interior e conforto térmico adequados aos seus ocupantes.

A importância do conforto térmico interior em edifícios residenciais tem sido amplamente estudada, como se pode constatar pelos diferentes existentes na literatura nacional e internacional, tendo em consideração os impactos que um menor conforto térmico tem na saúde, na produtividade e nos consumos energéticos [2-5].

Em Portugal, tal como no sul da Europa, o sistema construtivo mais utilizado, para os edifícios residenciais, assenta no uso intensivo de betão armado e alvenarias em tijolo, que lhes conferem uma elevada inércia térmica [6,7]. No entanto, nos últimos anos, sistemas construtivos alternativos e mais industrializados têm proliferado por todo o mundo e começado a ganhar o seu espaço no mercado em relação às soluções mais tradicionais.

Neste contexto, de edifícios modulares tem despertado uma maior atenção de potenciais compradores, investidores e da própria indústria da construção, tendo em conta as inúmeras

vantagens deste método construtivo sobre os métodos tradicionais de construção, nomeadamente: necessitam de um menor número de trabalhadores no local, os processos construtivos são mais rápidos e seguros, os processos construtivos são mais ecológicos e amigos do ambiente e com tempos de finalização mais previsíveis, existe menos desperdício de recursos, apresentar inúmeras vantagens em construções em que se repete unidades construídas.

Assim, com o crescente interesse no estudo do desempenho energética de edifícios, torna-se útil integrar e gerir informação a partir de modelos BIM (*Building Information Modelling*) e BEM (*Building Energy Modelling*) [8]. Deste modo, é benéfico levantar a geometria 3D de edifícios “as-is” de forma a possibilitar efetuar análises energéticas do mesmo posteriormente [9].

A utilização de novas tecnologias no estudo de edifícios tem aumentado, incluindo o uso de drones (também conhecidos como UAS, de *Unmanned Aircraft Systems* – Aeronaves Não Tripuladas) [9], sendo que estes aparelhos trazem variadas vantagens, como o reduzido esforço humano e mais segurança, acesso a locais de difícil acesso, redução de tempos, baixo custo, etc. [10,11]. Estes podem ser aplicados nas variadas fases do ciclo de vida de uma construção [10-12], com diversos níveis de adoção [11]. De acordo com Albeaino e Gheisari [10], destaca-se principalmente a monitorização do progresso da obra e o planeamento e levantamento da mesma.

De acordo com a KPMG International, o nível de adoção de drones no setor da construção a nível mundial ronda os 26% [13], estando 45% a iniciar a sua utilização, um valor ainda bastante longe da realidade nacional, que se situa apenas nos 12% [14]. Como tal, este artigo pretende demonstrar a utilidade do uso de drones para a otimização de soluções, do ponto de vista energético, de uma habitação em território português, por meio de um caso de estudo.

Metodologia

A habitação em estudo (Figura 1) situa-se na cidade costeira de Esposende, no distrito de Braga. Como forma de adquirir dados do edifício em estudo, foi utilizada uma metodologia já existente para a realização de levantamentos fotogramétricos de edifícios com drones como base de apoio ao trabalho [15,16]. Este fluxo contínuo de metodologias UAS-to-BIM e BIM-to-BEM teve como objetivo final a otimização de soluções construtivas em termos energéticos. Para o efeito, serão comparados os resultados experimentais de monitorização com os obtidos por simulação energética, através do DesignBuilder.



Figura 1: A habitação em estudo. Fotografia tirada pelo drone.

Levantamento Fotogramétrico com Drone. Primeiramente, planeou-se o voo do drone de acordo com as especificidades do local, isto é, verificou-se quais as normas do espaço aéreo aplicáveis, as condições em termos de obstáculos e meteorológicas e, com estes dados, pôde-se idealizar um plano de voo adequado a este espaço.

Em termos regulamentares, é necessário efetuar a operação de levantamento de acordo com os regulamentos europeus em vigor para o voo de drones ([17,18]). Para além dos regulamentos europeus, também as regras nacionais devem ser seguidas, nomeadamente as estipuladas pela ANAC (Autoridade Nacional da Aviação Civil) – zonas geográficas, alturas máximas de voo, etc.[19] – e pela AAN (Autoridade Aeronáutica Nacional) em termos de captação de imagens com as câmaras dos UAS [20]. Menciona-se ainda os registos do drone, do piloto remoto e do operador (o “dono”), e as identificações e seguros necessários para o voo legal deste equipamento.

O edifício em estudo encontra-se fora de zonas geográficas condicionadas ou proibidas para voo destas aeronaves estipuladas pela ANAC, pelo que o voo está autorizado até 120 m de altura [21]. Contudo, é necessária autorização de captação de imagens por parte da AAN para evitar violar a política de proteção de dados pessoais [22].

O local foi inspecionado antes do levantamento com o auxílio da *app* Guardian by Altitude Angel, que identificou que a habitação era atravessada por cabos provenientes dum posto de transformação nas proximidades. Deste modo, para se planear o voo corretamente analisou-se as imagens do Google Street View e fez-se uma visita prévia ao local.

Após esta verificação, planeou-se a operação de levantamento na *app* Drone Harmony Mobile com uma altura de voo de 15 m (por segurança, por cima dos cabos), com o modo de grelha tripla, 90% de sobreposição entre imagens e com um ângulo da câmara do drone de 45°.

O levantamento foi efetuado na manhã de 12 de julho de 2022, por volta das 10h, tendo-se obtido 249 fotografias para a reconstrução 3D do edifício. Foi utilizado o drone disponível no Departamento de Engenharia Civil da FEUP, devidamente calibrado (ver [23]) para este trabalho: um DJI Mavic 2 Enterprise Dual, de 899g, com uma câmara de 12 MP e, também, com capacidade de adquirir informação termográfica, que não foi utilizada para este estudo.

A Figura 2 mostra a descolagem do drone no início da operação de levantamento fotogramétrico aéreo do edifício e durante esse procedimento conforme programado previamente.

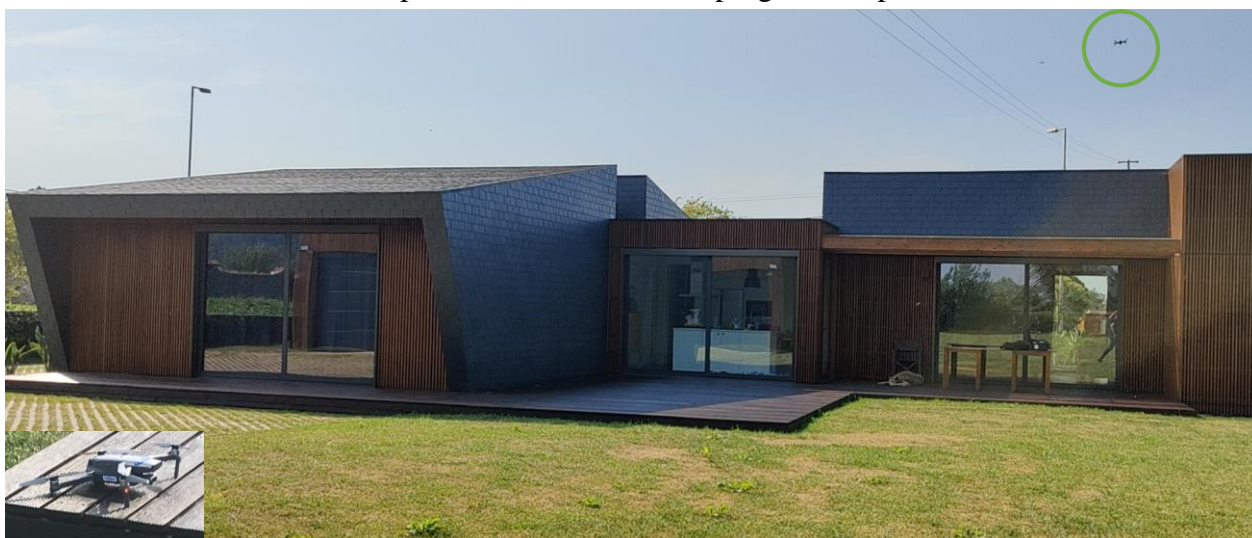


Figura 2: Descolagem do drone para começo do levantamento fotogramétrico aéreo e durante a operação conforme programado na *app* Drone Harmony Mobile.

Reconstrução 3D e Modelo BIM (UAS-to-BIM). Na fase seguinte à recolha das imagens georreferenciadas, estas são inseridas num programa capaz de reconstruir objetos 3D a partir de imagens. Neste caso foi utilizado o Agisoft Metashape para esse efeito, gerando assim uma nuvem de pontos 3D (*point cloud*) da zona levantada. Caso seja pretendido, é possível criar malhas poligonais 3D a partir das nuvens de pontos (denominadas por *3D mesh models*), que têm uma melhor representação e completude por comparação.

Na Figura 3 pode-se observar a *point cloud* densa criada no programa utilizado (com cerca de 55.66 milhões de pontos) e o *mesh model* 3D da fachada Norte do edifício (com aproximadamente 4.56 milhões de faces e 2.28 milhões de vértices).

Antes de se exportar, deve-se eliminar os pontos da nuvem não necessários ao modelo BIM (por exemplo, árvores, outros edifícios, a garagem, etc.). Esta foi reduzida a 2.71 milhões de pontos e, em seguida, foi exportada no formato .LAS – que é um formato capaz de exportar nuvens de pontos e incorporá-las em ambientes BIM [24].

Se for pretendido importar para o Autodesk Revit (como foi o caso deste trabalho), deve ser feita uma conversão do formato anterior para um dos dois que o Revit consegue ler *point clouds* (.rcp e .rcs). Esta conversão foi efetuada no Autodesk ReCap e, de seguida, importou-se a nuvem para o Revit.



Figura 3: Reconstrução fotogramétrica do edifício em estudo, fachada Norte. À esquerda, a sua nuvem de pontos, e à direita, a sua *mesh* 3D.

Ao importar a nuvem de pontos 3D (neste caso, em .rcp) para o Revit, deve-se ajustar a rotação e orientação da mesma (tanto este processo como a limpeza também podem ser efetuados no ReCap [25]), além de se dever acrescentar os níveis do edifício. Terminado este processo, começa-se a modelar o modelo BIM da habitação ((nomeadamente a envolvente da mesma) por auxílio da nuvem. A Figura 4 resume o procedimento até aqui descrito:

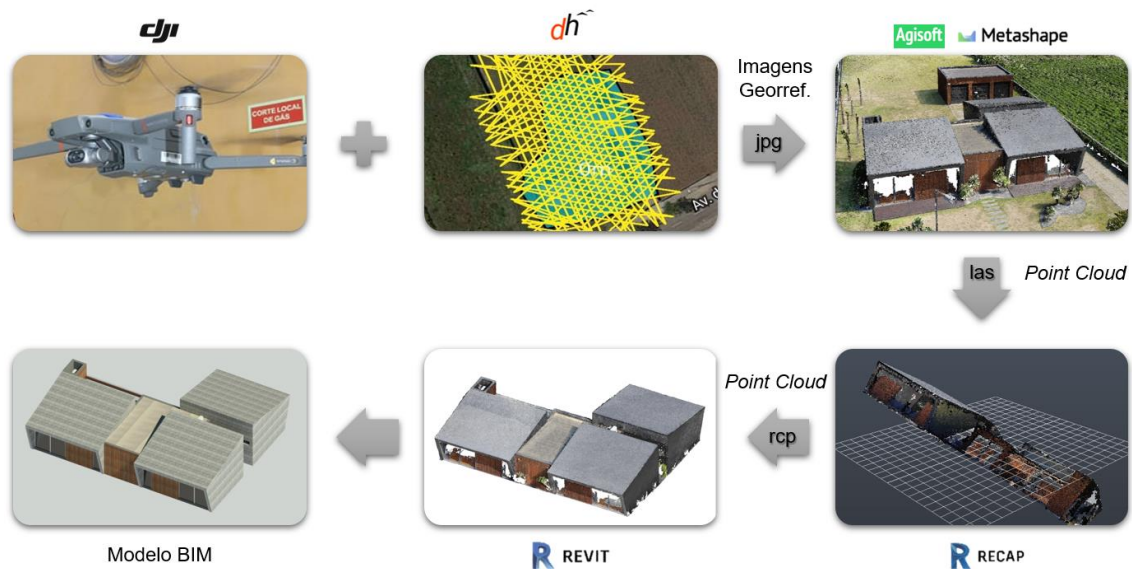


Figura 4: Procedimento UAS-to-BIM adotado, desde o levantamento fotogramétrico ao modelo BIM da habitação em estudo

Modelo BEM e Simulações Energéticas (BIM-to-BEM). Problemas de interoperabilidade entre programas BIM e BEM devem ser acautelados aquando da transferência de formatos entre programas [26,27]. Assim sendo, simplificou-se a geometria do edifício [28–30] - com objetos de LOD 200-300 [31], de forma a evitar colisões entre elementos, uma vez que criam aberturas no modelo BEM [30].

Criou-se um “Espaço” no Revit cobrindo o volume total do modelo BIM, sendo este um passo fulcral para as simulações energéticas [27–30]. Um espaço corresponde a um volume fechado que é termicamente simulado e ao qual são atribuídas propriedades térmicas [30]. Assim sendo, tem como finalidade a criação do modelo analítico do Revit em termos energéticos [23,25] e, caso existam aberturas ou falhas geométricas, o modelo poderá nem sequer conseguir ser exportado [25,30]. Caso aconteça este problema na exportação, deve-se retornar ao Revit e corrigi-lo [25].

Criou-se ainda um “Ambiente”, pois a este são vinculadas informações úteis à simulação energética, como por exemplo a ocupação do edifício [29,32].

Quanto ao formato de exportação, foi escolhido o gbXML. Este e o IFC são os formatos mais utilizados em processos BIM-to-BEM [8,27], no entanto, o gbXML é tido como tendo desempenho superior no que toca a modelos BEM com base em modelos BIM (BIM-to-BEM), pois é capaz de importar corretamente a geometria (simplificada), os materiais e as zonas térmicas do modelo [8,28].

O programa de simulação energética utilizado foi o DesignBuilder, sendo este um programa capaz de importar o gbXML proveniente do Revit com a geometria do edifício e, posteriormente, capaz de inserir as propriedades necessárias à simulação de forma a se evitar problemas de interoperabilidade entre programas [32]. O modelo importado no DesignBuilder pode ser observado na Figura 5.

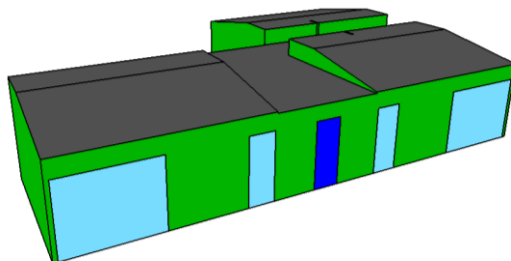


Figura 5: Geometria importada para o DesignBuilder, no formato gbXML.

De seguida foram inseridos os materiais e as suas respetivas propriedades, montando as diversas construções do modelo (Tabelas 1 e 2).

Tabela 1: Materiais usado e suas propriedades.

Material	Espessura [m]	λ [W/m.K]	ρ [kg/m ³]	Cp [J/kg.K]
Paredes				
Poliestireno expandido (EPS 100)	0.030	0.037	20	1550
OSB	0.012	0.120	600	1700
Lã rocha	0.100	0.040	50	800
Gesso Cartonado	0.013	0.350	750	840
Pavimentos				
Betão	0.200	2.000	2400	940
Madeira CL4	0.028	0.230	800	1500
Lã rocha	0.050	0.045	25	800
OSB	0.022	0.120	600	1700
Pavimento flutuante	0.007	0.130	400	1300
Cobertura				
OSB	0.022	0.120	600	1700
Lã rocha	0.200	0.040	70	800
Teto	0.020	0.130	400	1300

Tabela 2: Materiais usados nas janelas e suas propriedades.

Vãos (janelas)	Espessura [m]	λ [W/m.K]	Transmitância solar	Reflectância solar exterior	Reflectância solar interior
CLEAR	0.03	0.900	0.837	0.075	0.075
Camada de ar	0.13	-	-	-	-
PYR B CLEAR	0.03	0.900	0.740	0.090	0.100

De seguida, foram escolhidos os horários de ocupação e de funcionamento do equipamento. O perfil dos horários pode ser visto na Figura 6. Foi utilizado nas simulações numéricas um sistema AVAC para garantir conforto térmico, através da utilização de um ventilador-convetor de 4 tubos. Para aquecimento foi usado gás natural enquanto que para arrefecimento foi escolhida a eletricidade. Os pontos de ajuste escolhidos foram 18°C e 25°C para aquecimento e arrefecimento, respetivamente. Finalmente, foi criado um ficheiro climático de Esposende para as simulações.

Resultados e Discussão

Paralelamente à criação de um modelo energético, foi realizado um estudo de medição de temperatura e humidade relativa nas várias divisões da habitação através do uso de sensores (HOBO MX CO₂). A disposição destes pode ser consultada na Figura 7a. O modelo foi dividido também em diferentes zonas térmicas que representam uma aproximação das divisões da habitação, conforme visto na Figura 7b.

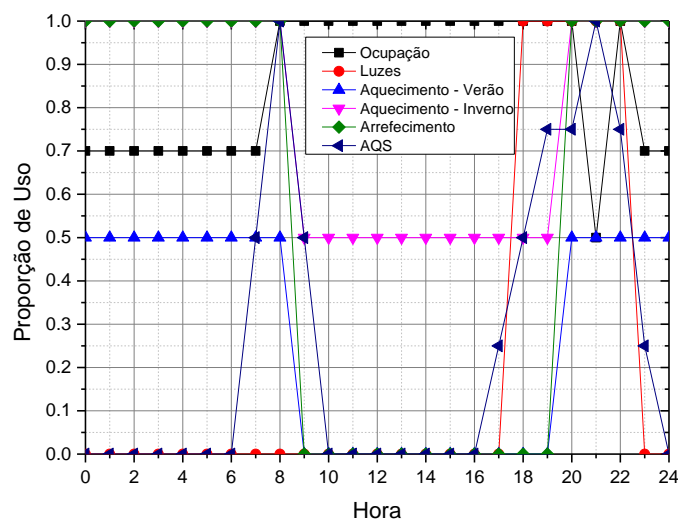


Figura 6: Horários escolhidos para a simulação

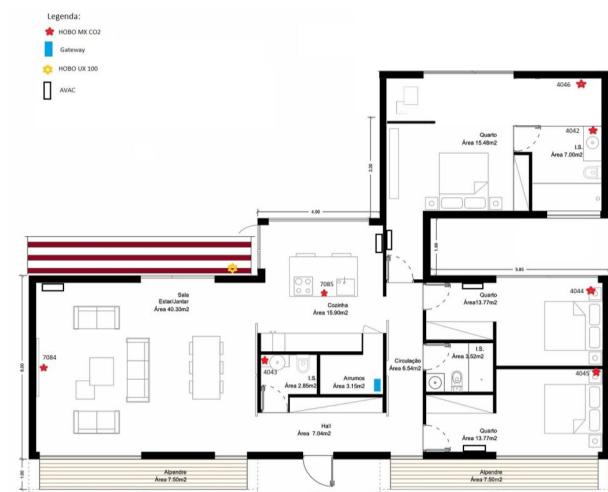


Figura 7: a) Localização dos diferentes sensores.

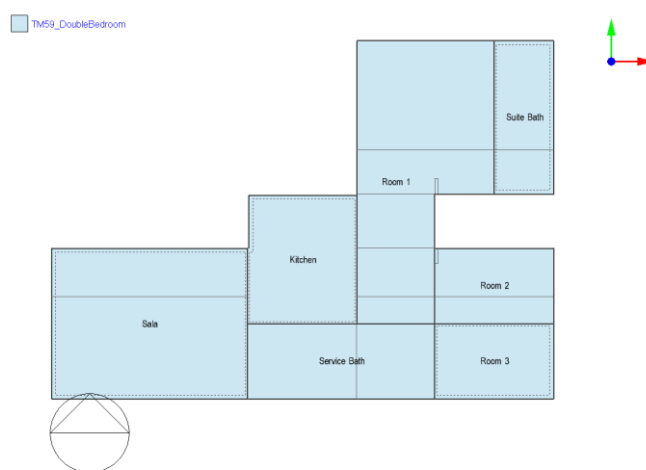


Figura 7: b) Divisão em diferentes zonas térmicas

Além dos 7 sensores distribuídos pela habitação, foi incluído um oitavo sensor (HOB0 UX100) no exterior para medição da temperatura e da humidade relativa. Os resultados do sensor exterior permitiram criar o ficheiro climático utilizado nas simulações numéricas.

Numa primeira análise, mais simplista, considerou-se a habitação como sendo apenas uma zona térmica, pelo que foram utilizados os valores médios da temperatura e humidade relativas obtidos pelos 7 sensores interiores, por forma a comparar com os resultados das simulações. Esta comparação pode ser observada na Figura 8.

Os resultados apresentados nesta Figura mostram uma boa concordância entre as temperaturas medidas experimentalmente e as obtidas por simulação numérica. No entanto, é de realçar a existência de discrepâncias mais significativas durante os meses da Primavera e Verão. Estes desvios, de cerca de 2°C a 3°C, podem ser explicados pelo uso real do sistema de climatização *on demand*, por parte dos utilizadores. Um horário constante todos os dias ou um registo por parte dos utilizadores do uso do sistema AVAC poderia ajudar a aproximar os resultados obtidos por simulação dos resultados reais.

Em seguida, o caso de estudo foi desagregado em diferentes zonas térmicas (conforme apresentado na Figura 7b). Segue-se a comparação entre os resultados experimentais e simulados para as diferentes zonas térmicas através da apresentação das Figuras 9 a 12. Pode-se observar, na Figura 9a, para a primeira zona térmica – sala, que de um modo geral, nesta análise ainda preliminar de afinação dos resultados numéricos aos valores de monitorização, os valores de temperatura reais medidas estão em linha com os resultados numéricos. No entanto, pode-se observar alguns *outliers*,

registados em junho e julho, muito provavelmente devido á menor concordância do sistema AVAC utilizado nas simulações e a sua utilização real em serviço. Na Figura 9b, quarto-suite, observa-se um perfil semelhante ao da sala com os valores da simulação ligeiramente inferiores aos obtidos por simulação, nos meses mais quentes e com alguns *outliers* registados em julho.

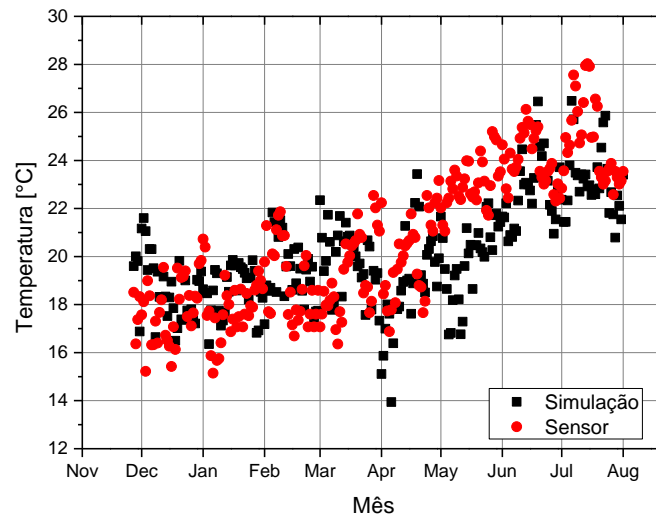


Figura 8: Comparação entre a temperatura média dos sensores e os resultados obtidos na simulação da habitação com uma zona térmica.

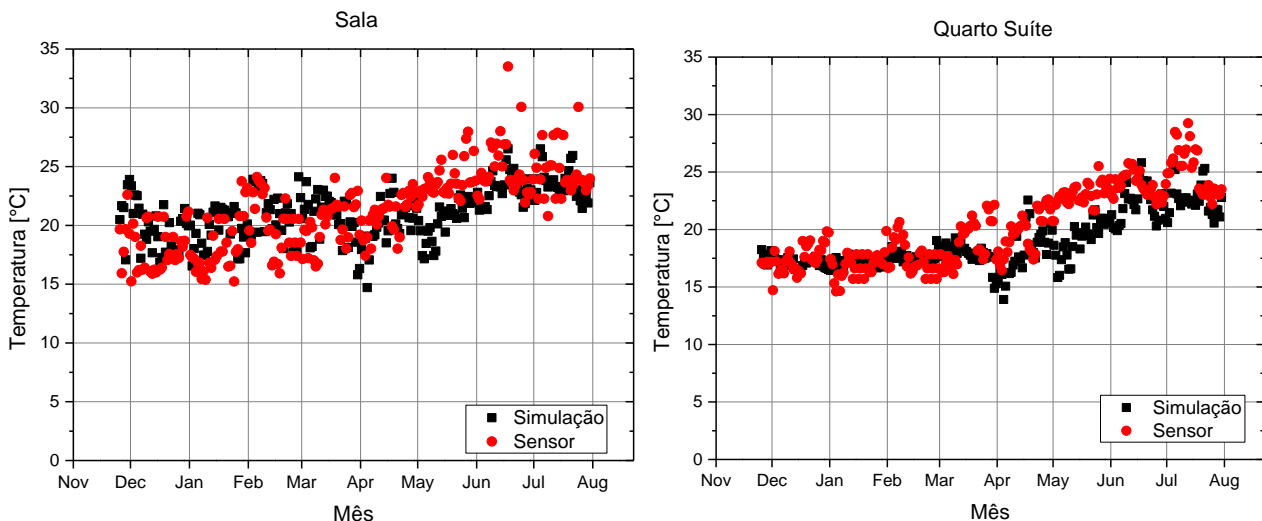


Figura 9: Comparação entre a temperatura medida e os resultados obtidos na simulação para: a) sala e b) suite.

Na Figura 10, Quarto 2 e Quarto 3, os resultados numéricos e obtidos por monitorização apresentam uma melhor concordância, no entanto continuamos a observar alguns valores resultantes da simulação que se afastam dos valores reais em algumas horas do dia. Como exemplo, temos alguns valores de temperatura perto dos 30°C, no mês de julho, valores esses não observados nos resultados experimentais de monitorização contínua.

A Figura 11 compara os resultados obtidos para as duas casas de banho mais utilizadas na habitação em estudo. Podemos observar mais uma vez um perfil bastante semelhante ao obtido nas restantes zonas térmicas do caso de estudo. No entanto, a casa de banho da suite, por ser a mais utilizada, apresenta, nos meses de maio e junho valores medidos cerca de 2°C superiores aos obtidos por simulação numérica. Mais uma vez observa-se *outliers* nos valores resultantes da simulação para o mês de julho.

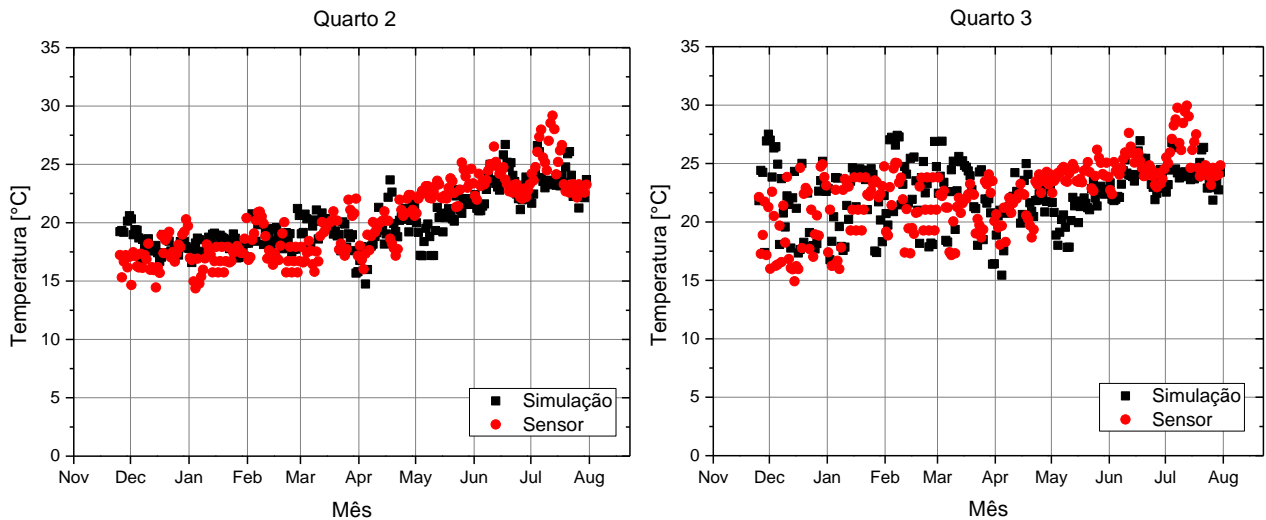


Figura 10: Comparação entre a temperatura medida e os resultados obtidos na simulação para: a) quarto 2 e b) quarto 3.

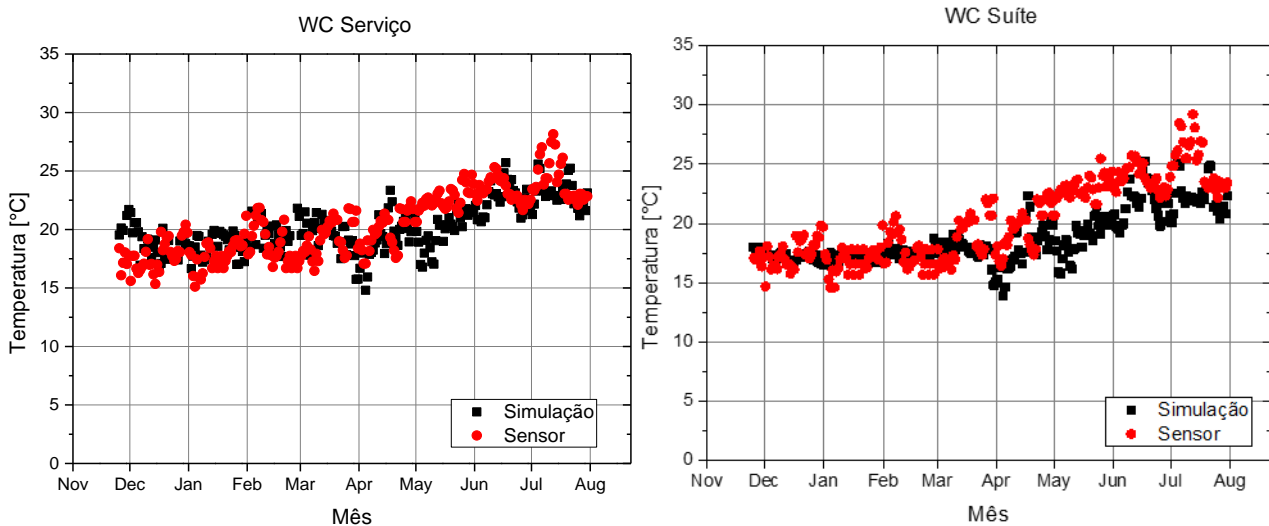


Figura 11: Comparação entre a temperatura medida e os resultados obtidos na simulação para: a) wc serviço e b) wc suite.

Por fim, analisou-se os resultados obtidos para a cozinha, em *open-space* com a sala (ver Figura 12). Verifica-se que de um modo geral os valores de temperatura reais estão ligeiramente acima dos valores obtidos por simulação numérica, para os meses mais quentes, e ligeiramente mais baixos que os valores simulados, nos meses mais frios. No entanto, convém referir que esta diferença, de cerca de 1°C, não é significativa e deve-se ao fato destes resultados obtidos por simulação numérica estarem ainda numa fase bastante preliminar, precisando o modelo numérico ainda ser afinado/melhorado.

Assim, em termos gerais, podemos constatar que os valores máximos de temperatura registados nos sensores são superiores aos valores obtidos através da simulação. O oposto acontece para os valores mínimos de temperatura, onde estes são mais baixos nos resultados simulados. Uma possível justificação que já foi mencionada anteriormente é a necessidade de ajustar o sistema de aquecimento/arrefecimento do modelo numérico ao real utilizados pelos habitantes do caso de estudo.

Não obstante, a gama de valores observada tanto para 1 zona térmica a representar a habitação como quando comparando as divisões da habitação em diferentes zonas térmicas é bastante semelhante entre os valores obtidos pelos sensores e os obtidos por simulação numérica.

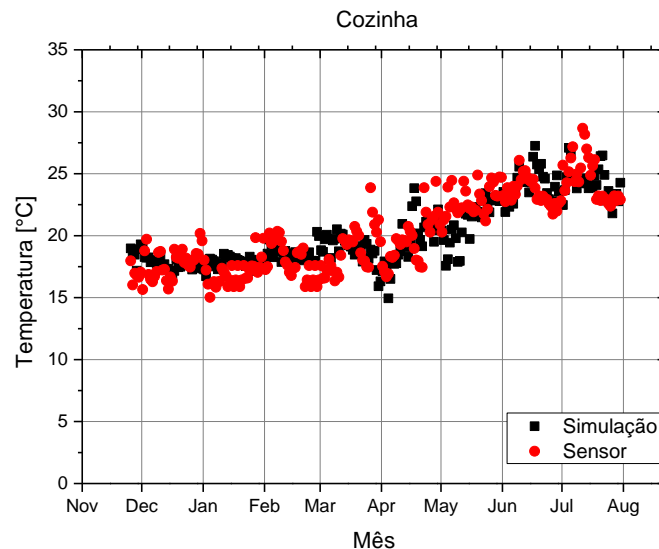


Figura 12: Comparação entre a temperatura da cozinha e os resultados obtidos na simulação.

Conclusão

A utilização de drones no setor da construção tem crescido, trazendo consigo variadas vantagens úteis ao mesmo. Apesar da adoção de drones na construção já ser ampla a nível mundial, em Portugal a sua incorporação ainda está bastante atrasada. Como tal, o presente artigo pretende demonstrar a utilidade da adoção destas aeronaves para a otimização de soluções, do ponto de vista energético, de uma habitação em território nacional.

O método adotado segue um fluxo contínuo desde o levantamento fotogramétrico com o drone até às simulações no DesignBuilder. Antes disso, passa primeiramente pela criação do modelo BIM no Autodesk Revit por auxílio da nuvem de pontos criada no Agisoft Metashape (e convertida no Autodesk ReCap para um formato compatível com o Revit), antes de se exportar o modelo para o programa de simulação energética.

Após a exportação do modelo em gbXML do Revit para o DesignBuilder, foram inseridos os diversos parâmetros de simulação, referentes aos materiais usados assim como os horários de ocupação e uso dos equipamentos relevantes para o estudo térmico. Foram também colocados 7 sensores dentro das diversas divisões da habitação e um sensor no exterior para medir a temperatura e a humidade relativa.

Da análise comparativa entre os resultados da monitorização e os valores, preliminares, obtidos por simulação numérica pode-se observar que estes são consistentes, com as maiores diferenças a poderem ser explicadas pela menos correta aproximação do sistema de aquecimento/arrefecimento usado no modelo numérico.

Futuramente outros tipos de análises poderão ser realizadas, nomeadamente a quantidade de energia necessária para garantir o conforto térmico dentro da habitação e o custo associado. Outra análise interessante será a incorporação de soluções fotovoltaicas acopladas com um sistema de armazenamento de energia (como uma bateria redox de escoamento, por exemplo) para diminuir os custos, ou até talvez tornar a habitação independente da rede elétrica e de gás.

Agradecimentos

O trabalho resulta do Projeto de Investigação “BlueWoodenHouse”, com a referência POCI-01-0247-FEDER-047157, co-financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (ERDF) por meio do Programa Operacional de Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), no âmbito do acordo de parceria Portugal 2020. Além disso, este trabalho foi apoiado financeiramente por LA/P/P/0045/2020 (ALiCE), Financiamento Base - UIDB/04708/2020 e UIDB/00511/2020, Financiamento Programático - UIDP/04708/2020 (CONSTRUCT) e UIDP/00511/2020 (LEPABE), financiados por fundos nacionais através do FCT/MCTES

(PIDDAC); e pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do Estímulo ao Emprego Científico Individual 2020.00828.CEECIND.

Referências

- [1] World Health Organization, Regional Office for Europe, D.A. Sarigiannis, *Combined or Multiple Exposure to Health Stressors in Indoor Built Environments*; World Health Organization: Copenhagen, Denmark, (2014).
- [2] D. Ormandy, V. Ezratty, *Housing, health, and the domestic environment*, Book: Clay's Handbook of Environmental Health, (2022) 490-515.
- [3] G. Alfalah, A. Al-Sakkaf, E.M. Abdelkader, T. Zayed, *An integrated fuzzy-based sustainability framework for post-secondary educational buildings: A user-perspective approach*, Sustainability, 14 (2022) 9955.
- [4] R. Escandón, R. Suárez, A. Alonso, G.M. Mauro, *Is indoor overheating an upcoming risk in southern Spain social housing stocks? Predictive assessment under a climate change scenario*, Building and Environment, 207 (2022) 108482.
- [5] Y. Xu, C. Yan, S. Yan, H. Liu, Y. Pan, F. Zhu, Y. Jiang, *A multi-objective optimization method based on an adaptive meta-model for classroom design with smart electrochromic windows*, Energy, 243 (2022) 122777.
- [6] Y. Elaouzy, A. El Fadar, *Energy, economic and environmental benefits of integrating passive design strategies into buildings: A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 167 (2022) 112828.
- [7] E. Roque, R. Vicente, R.M.S.F. Almeida, *Indoor thermal environment challenges of light steel framing in the southern European context*, Energies 14 (2018) 7025.
- [8] H. Gao, C. Koch, Y. Wu, *Building information modelling based building energy modelling: A review*, Applied Energy, 238 (2019) 320–343.
- [9] Y. Hou, R. Volk, M. Chen, L. Soibelman, *Fusing tie points' RGB and thermal information for mapping large areas based on aerial images: A study of fusion performance under different flight configurations and experimental conditions*, Automation in Construction, 124 (2021) 103554.
- [10] G. Albeaino, M. Gheisari, *Trends, benefits, and barriers of unmanned aerial systems in the construction industry: A survey study in the United States*, Journal of Information Technology in Construction, 26 (2021) 84–111.
- [11] M.R. Freeman, M.M. Kashani, P.J. Vardanega, *Aerial robotic technologies for civil engineering: Established and emerging practice*, Journal of Unmanned Vehicle Systems, 9 (2021) 75–91.
- [12] Y. Li, C. Liu, *Applications of multirotor drone technologies in construction management*, International Journal of Construction Management, 19 (2019) 401–412.
- [13] KPMG International, *No Turning Back - An Industry Ready to Transcend - 2021 Global Construction Survey*, (2021).
- [14] T.D.P. Correia, *Análise da Implementação da Digitalização na Construção*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil - FEUP, Porto, Portugal (2022).
- [15] D.F.R. Parracho, *Processos Digitais para a Realização de Levantamentos Fotogramétricos e Termográficos com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT)*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil - FEUP, Porto, Portugal (2021).

- [16] D.F.R. Parracho, J.P. Martins, E. Barreira, Metodologia Digital para a Realização de Levantamentos Fotogramétricos e Termográficos de Edifícios Existentes com Drones – Caso de Estudo. In: 4o Congresso Português de ‘Building Information Modelling’ vol. 2 - ptBIM. UMinho Editora, Braga, Portugal (2022) 395–406.
- [17] The European Commission, *Commission Delegated Regulation (EU) 2019/945 - of 12 March 2019 - on unmanned aircraft systems and on third-country operators of unmanned aircraft systems*. Official Journal of the European Union, 62 (2019) L 152/1-L 152/40
- [18] The European Commission, *Commission Implementing Regulation (EU) 2019/947 - of 24 May 2019 - on the rules and procedures for the operation of unmanned aircraft*. Official Journal of the European Union, 62 (2019) L 152/45-L 152/71
- [19] ANAC, www.anac.pt/vPT/Generico/drones/categoria_aberta/Paginas/CategoriaAberta.aspx, Accessed 1 Aug 2022.
- [20] AAN, e-Autoridade Aeronáutica Nacional - Guia Rápido para Operadores. 1–11 (2019).
- [21] ANAC, 2020, <https://uas.anac.pt/explore>, Accessed 6 May 2021
- [22] AAN e-AAN, <https://imagensaereas.aan.pt/checklogin>, Accessed 1 Aug 2022
- [23] DJI, MAVIC 2 ENTERPRISE SERIES - Manual do Utilizador v1.8. 69 (2020).
- [24] Opincar E. *Assessing the Technology Used by UAVs in Data Acquisition on Construction Sites*, MSc Dissertation, University of Washington, Seattle, WA, USA (2016).
- [25] T.G. Prata, *Avaliação Energética com Recurso ao BIM para Escolha de Estratégias de Reabilitação - Bairro do Lordelo do Ouro, Porto*, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil – FEUP, Porto, Portugal (2022).
- [26] E. Kamel, A.M. Memari, *Review of BIM’s application in energy simulation: Tools, issues, and solutions*. Automation in Construction 97 (2019) 164–180.
- [27] G.B. Porsani, Del Valle De Lersundi K, Sánchez-Ostiz Gutiérrez A, Fernández Bandera, *Interoperability between Building Information Modelling (BIM) and Building Energy Model (BEM)*, Applied Sciences 11 (2021) 2167.
- [28] M.H. Elnabawi, *Building Information Modeling-Based Building Energy Modeling: Investigation of Interoperability and Simulation Results*. Frontiers in Built Environment, 6 (2020) 573971.
- [29] M.H. Elnabawi, N. Hamza, *Investigating Building Information Model (BIM) to Building Energy Simulation (BES): Interoperability and Simulation Results*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, New Cairo, Egypt 397 (2019) 12013.
- [30] H. Alhaidary, A.K. Al-Tamimi, H. Al-Wakil, *The combined use of BIM, IR thermography and HFS for energy modelling of existing buildings and minimising heat gain through the building envelope: a case-study from a UAE building*. Advances in Building Energy Research, 15 (2019) 709- 732.
- [31] L. Sanhudo, J.P. Martins, N.M.M. Ramos, R.M.S.F. Almeida, A. Rocha, D. Pinto, E. Barreira, M.L. Simões, *BIM framework for the specification of information requirements in energy-related projects*, Engineering, Construction and Architectural Management, 28 (2021) 3123–3143.
- [32] B.P. Pimentel, A.T.R. Barbosa, M.D. Souza, *Análise de métodos de integração entre bim e simulação termo energética de edificações militares*, Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, 9 (2020) 125–146.

Medição do teor de humidade em materiais de construção com a técnica time-domain reflectometry

FREITAS Teresa Stingl^{1*}, GUIMARÃES Ana Sofia¹, ROELS Staf², FREITAS Vasco Peixoto de¹ e CATALDO Andrea³

¹CONSTRUCT – LFC, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto

²Building Physics and Sustainable Design, Department of Civil Engineering, KU Leuven

³Department of Innovation Engineering, University of Salento

tsf@fe.up.pt; anasofia@fe.up.pt; gustaaf.roels@kuleuven.be; vpfreita@fe.up.pt;
andrea.cataldo@unisalento.it

Palavras-chave: TDR, Teor de humidade, Monitorização, Pedra calcária.

Resumo. A medição do teor de humidade em materiais de construção é fundamental tanto ao nível da prática profissional como ao nível da investigação. Contudo, apesar da grande variedade de técnicas disponíveis para determinar o teor de humidade em materiais de construção, efetuar medições em profundidade, *in situ* e de forma pouco invasiva ao longo do tempo é ainda um grande desafio. A técnica Time-Domain Reflectometry (TDR) é vulgarmente utilizada para medições do teor de humidade do solo, mas a sua aplicação em materiais de construção é ainda considerada um método inovador e pouco explorado, especialmente no que diz respeito à sua implementação em materiais de baixa porosidade. Os principais obstáculos à corrente utilização da técnica em materiais de construção consolidados são: (1) a dificuldade de garantir um bom contacto entre o sensor TDR e o material; (2) a falta de expressões de calibração adequadas entre a permissividade e o teor de humidade para materiais de construção; (3) a ausência de procedimentos padronizados para obter curvas de calibração adequadas; e (4) a necessidade de desenvolver ferramentas automáticas capazes de processar os dados e fornecer a evolução do teor de humidade ao longo do tempo. Nesta comunicação, apresenta-se uma metodologia capaz de ultrapassar os referidos obstáculos e proporcionar medições bem-sucedidas do teor de humidade com o método TDR. Os resultados obtidos numa amostra de pedra calcária demonstram que a técnica TDR é uma solução adequada para monitorizar o teor de humidade em materiais de construção, encorajando novos desenvolvimentos que potenciem uma utilização mais generalizada da técnica.

Introdução

A presença de humidade nos edifícios é um problema comum, recorrente e com consequências sérias para a sua preservação. Por esses motivos, a capacidade de medir o teor de humidade em materiais de construção é extremamente importante, quer para assegurar um correto diagnóstico das patologias associadas à humidade, quer para permitir a adoção de medidas de intervenção adequadas e a avaliação da sua eficácia ao longo do tempo. Contudo, apesar da reconhecida importância deste tema e da grande variedade de técnicas disponíveis para determinar o teor de humidade em materiais de construção, efetuar medições em profundidade, *in situ* e de forma pouco invasiva ao longo do tempo é ainda um grande desafio. De facto, a maior parte dos métodos correntemente adotados requerem a recolha de amostras de material, o que impede a realização de medições sucessivas e contínuas do teor de humidade no mesmo local. Outra alternativa muito frequente tem por base a realização de análises assentes em medições superficiais do teor de humidade. Neste caso, apesar dos elementos construtivos serem totalmente preservados, é apenas possível obter uma informação parcial do seu teor de

humidade, já que as privilegiadas condições de evaporação perto da superfície distorcem, muitas vezes, o verdadeiro estado do seu interior. Para além disso, o equipamento exigido por algumas técnicas de medição do teor de humidade, como o envolvido no método baseado na atenuação de raios γ ou no método de ressonância magnética (NMR), tornam estas soluções mais adequadas para medições em laboratório, dificultando, ou até mesmo impedindo, aplicações *in situ* [1]. Por todos estes motivos, na prática corrente e também na investigação, abordagens mais pragmáticas e que permitem medir indiretamente o teor de humidade acabam por ser adotadas. Um exemplo, ainda muito popular, passa pela utilização de sensores de humidade relativa, mesmo tendo em conta a sua maior incerteza e desadequação quando se pretende monitorizar valores do teor de humidade no domínio capilar [2]. É, portanto, claro que efetuar medições precisas do teor de humidade em materiais de construção é um assunto complexo e que até ao momento continua a ser objeto de investigação. Neste trabalho, a técnica Time-Domain Reflectometry (TDR) é explorada como uma solução para monitorizar de forma contínua, em profundidade e de modo pouco invasivo o teor de humidade em materiais de construção. O carácter inovador da técnica para este propósito, as dificuldades existentes e a falta de procedimentos padronizados, impulsionou o desenvolvimento de uma metodologia capaz de proporcionar medições bem-sucedidas do teor de humidade com o método TDR. A metodologia proposta foi testada numa amostra de pedra calcária e os resultados obtidos mostram que a técnica é adequada para monitorizar o teor de humidade em materiais de construção consolidados.

A técnica Time-Domain Reflectometry (TDR)

A história da utilização da técnica TDR no domínio da engenharia e das ciências naturais é longa e conta com inúmeras aplicações que se estendem por diferentes campos. De facto, é um método comprovadamente aceite e reconhecido para medir o teor de humidade dos solos [3], para o controlo de qualidade de produtos alimentares [4], na localização de fugas em tubos subterrâneos [5] e na determinação das propriedades dielétricas de líquidos e materiais granulares [4]. Contudo, apesar do profundo conhecimento da técnica TDR como tecnologia de medição, a sua utilização na determinação do teor de humidade em materiais de construção é ainda considerada inovadora, principalmente no que diz respeito à sua implementação em materiais consolidados e pouco porosos. Em materiais de construção granulares ou de elevada porosidade, como é o caso do betão celular [6], do silicato de cálcio [7], de diferentes tipos de cimentos e argamassas [8] e de algumas variedades de tijolos [9], a técnica TDR já mostrou ser capaz de detetar variações do teor de humidade em ensaios laboratoriais de absorção de água por capilaridade. Apesar dos trabalhos já desenvolvidos, efetuar medições quantitativas e em profundidade do teor de humidade com a técnica TDR é ainda um desafio com poucas respostas e soluções. Os principais entraves a uma utilização mais generalizada da técnica em materiais de construção podem ser resumidos em duas categorias:

- Falta de sensores adequados e dificuldades no processo de instalação: a necessidade de garantir um bom contacto (sem espaços de ar) entre os sensores TDR e o material a monitorizar é fundamental para conseguir medições precisas com a técnica. Contudo, a maioria dos sensores TDR disponíveis no mercado, como o LP/MS [10], o FP/mts [11] ou o CS616 [12], foram desenvolvidos para medições do teor de humidade dos solos e, consequentemente, possuem hastes muito finas e longas que dificultam ou inviabilizam a sua instalação em materiais de construção rígidos. Por outro lado, os sensores TDR superficiais, elaborados especificamente para aplicações não invasivas em materiais de construção [13], só permitem medições nas camadas superficiais dos elementos. Assim, para medir o teor de humidade em profundidade, torna-se necessário utilizar sensores, semelhantes aos dos solos, mas com hastes de maior diâmetro e mais robustas que permitam a instalação em materiais de construção consolidados. Alguns autores já exploraram estes sensores protótipo nos seus trabalhos [8], mas, mesmo nestes casos, o desejado contacto perfeito entre o sensor e o

material continua a ser um objetivo difícil de alcançar.

– Inexistência de curvas de calibração apropriadas e ausência de procedimentos padronizados para as obter: a avaliação quantitativa do teor de humidade com a técnica TDR exige a utilização de curvas de calibração que permitam converter a permissividade dielétrica relativa, ϵ_{app} , diretamente fornecida pela técnica, no teor de humidade, w , do material em estudo, isto é, $w(\epsilon_{app})$. As funções empíricas de conversão desenvolvidas para os solos, como a de *Topp e Malicki*, continuam a ser frequentemente empregues para medir o teor de humidade em materiais de construção, apesar de alguns autores já terem demonstrado a sua desadequação [14, 15]. Por outro lado, as funções de conversão baseadas em modelos mistos dielétricos, apesar de promissoras, só foram exploradas e testadas numa pequena gama de materiais [16]. Assim, a determinação de uma curva de calibração específica para o material em estudo, através da comparação com um método de referência, continua a ser a solução mais fiável ainda que morosa. O método gravimétrico é de longe o método de referência mais utilizado para obter a correlação entre a permissividade medida com a técnica TDR e o teor de humidade do material. Contudo, há ainda uma falta de clareza e consenso nos procedimentos envolvidos neste processo [17].

Na secção seguinte propõe-se uma forma para ultrapassar as dificuldades mencionadas, bem como se apresenta uma síntese dos procedimentos envolvidos para quantificar o teor de humidade ao longo do tempo.

Medição do teor de humidade com a técnica TDR

O princípio de funcionamento de qualquer medição TDR consiste no lançamento de um sinal eletromagnético e no conseqüente estudo da sua propagação ao longo de um sensor inserido no material em estudo. Os fundamentos teóricos necessários à interpretação do sinal, bem como todos os equipamentos exigidos ao funcionamento da técnica já foram detalhadamente descritos em [18]. Na Figura 1 encontra-se uma representação esquemática dos principais passos envolvidos até à obtenção do teor de humidade com a técnica TDR. O primeiro passo consiste em efetuar uma calibração individual de cada sensor utilizado, e tem como objetivo determinar o “comprimento elétrico do sensor”, d , quando este é colocado no ar, uma vez que essa distância pode ser ligeiramente diferente da medida com uma fita métrica. A calibração individual é portanto necessária para garantir medições precisas com a técnica, é independente do material em estudo e só precisa de ser realizada uma vez antes da utilização dos sensores. A forma de efetuar essa primeira calibração encontra-se pormenorizadamente apresentada em [19]. Numa segunda etapa torna-se necessário instalar os sensores TDR no material em estudo. Neste trabalho, e para assegurar medições em profundidade, desenvolveram-se sensores especialmente adequados à utilização em materiais rígidos, sendo cada um constituído por duas hastes de 6 mm de diâmetro e 185 mm de comprimento. De modo a ultrapassar a dificuldade de garantir um bom contacto entre o sensor e o material, produziu-se uma peça de guia auxiliar metálica a qual permite efetuar furos com o paralelismo, dimensão e espaçamento necessários para que as hastes dos sensores sejam corretamente introduzidas sem a presença de espaços de ar.

Após a instalação dos sensores é possível obter um conjunto de gráficos (reflectogramas) para os vários instantes de tempo em análise (passo 3). A interpretação destes resultados diretos (descritos minuciosamente em [19]) permite, por meio da identificação de mínimos e máximos absolutos, calcular a permissividade dielétrica relativa do material ϵ_{app} (passo 4). Numa das finais e mais importantes fases deste processo é recomendável estabelecer uma curva de calibração para o material em estudo (passo 5). Neste trabalho o método gravimétrico foi utilizado como referência. Para isso, várias amostras de material foram imersas em água por diferentes períodos de tempo, seguindo-se de uma medição gravimétrica do seu teor de humidade, com a posterior impermeabilização total das amostras para garantir a redistribuição uniforme do teor de humidade e a validade das medições gravimétricas efetuadas. Uma vez estabelecida a curva de calibração do material, quantificar o seu teor de humidade ao longo do tempo ainda envolve a utilização de

ferramentas automáticas (como o MATLAB) que permitam um tratamento célere e em tempo útil dos resultados (passo 6).

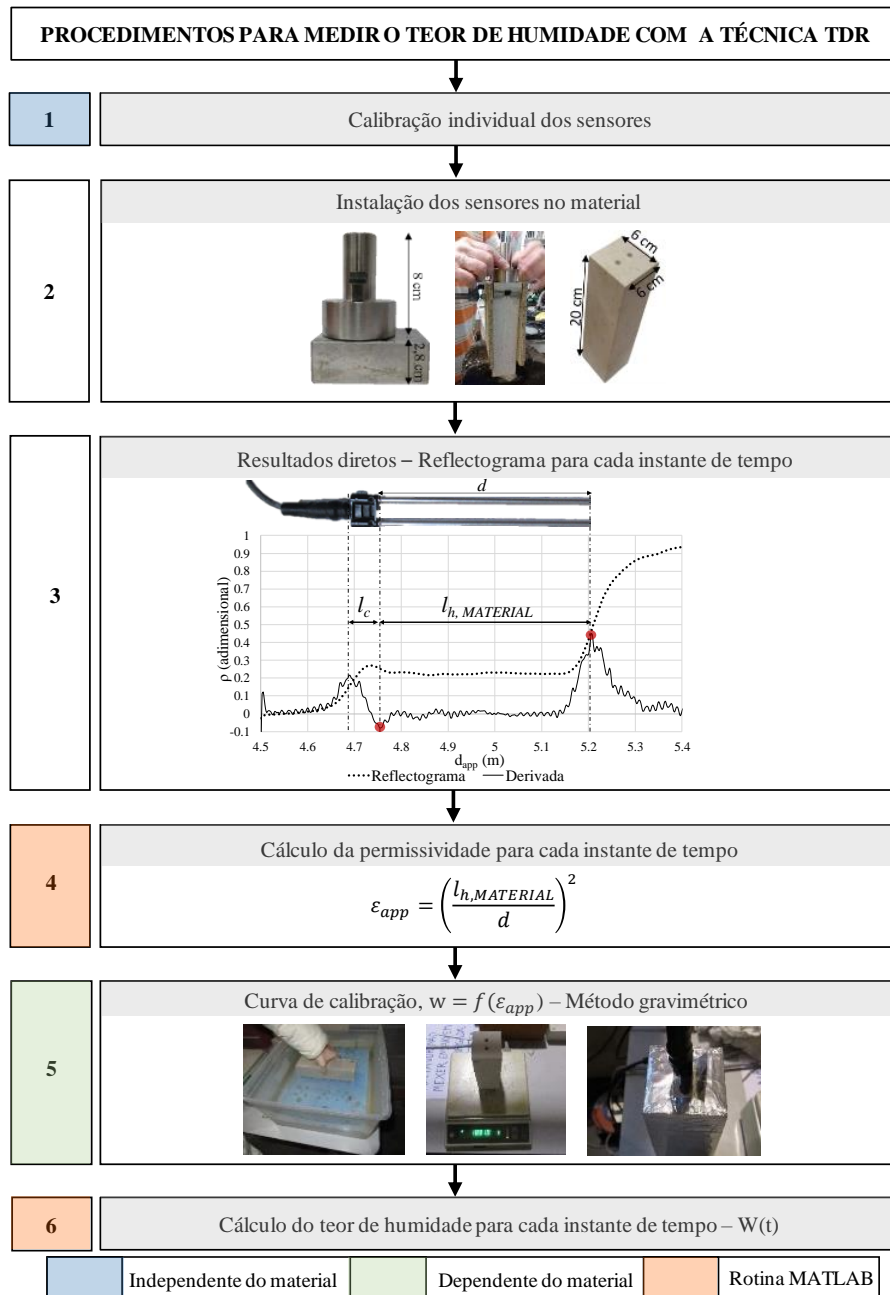


Figura 1: Sequência de procedimentos adotados para medir o teor de humidade em materiais de construção porosos consolidados com a técnica TDR

A metodologia apresentada na Figura 1 foi aplicada a uma amostra de pedra calcária (20cm x 6cm x 6cm) para monitorizar a evolução do seu teor de humidade durante um ensaio de secagem à temperatura ambiente ($T_{média}=21,5^{\circ}C$ e $HR_{média}=53,8\%$). O ensaio começou com a amostra completamente saturada, tendo-se efetuado um registo contínuo de medições TDR até à sua secagem. Os resultados obtidos apresentam-se organizados na Figura 2. Na Figura 2 a) é possível observar os reflectogramas registados para alguns instantes de tempo do ensaio (passo 3 da Figura 1). As medições refletem uma clara diferença entre os reflectogramas recolhidos quando a amostra estava completamente saturada e seca, bem como uma progressão gradual (a tender para o reflectograma característico do estado seco) durante o processo de secagem. Deste modo, o ensaio efetuado demonstrou que a técnica TDR é sensível para detetar pequenas variações do teor de humidade num material muito pouco poroso como é a pedra calcária em estudo (porosidade aproximadamente igual a 3%). Este tipo de resultados conseguem ser obtidos sem um grande esforço de processamento do sinal, dispensam o moroso processo de calibração, mas apenas

permitem efetuar uma análise qualitativa da evolução do teor de humidade. Contudo, para muitas aplicações práticas da engenharia civil a possibilidade de monitorizar variações relativas do teor de humidade ao longo do tempo é suficiente para detetar patologias ou avaliar a eficácia de determinadas soluções de tratamento.

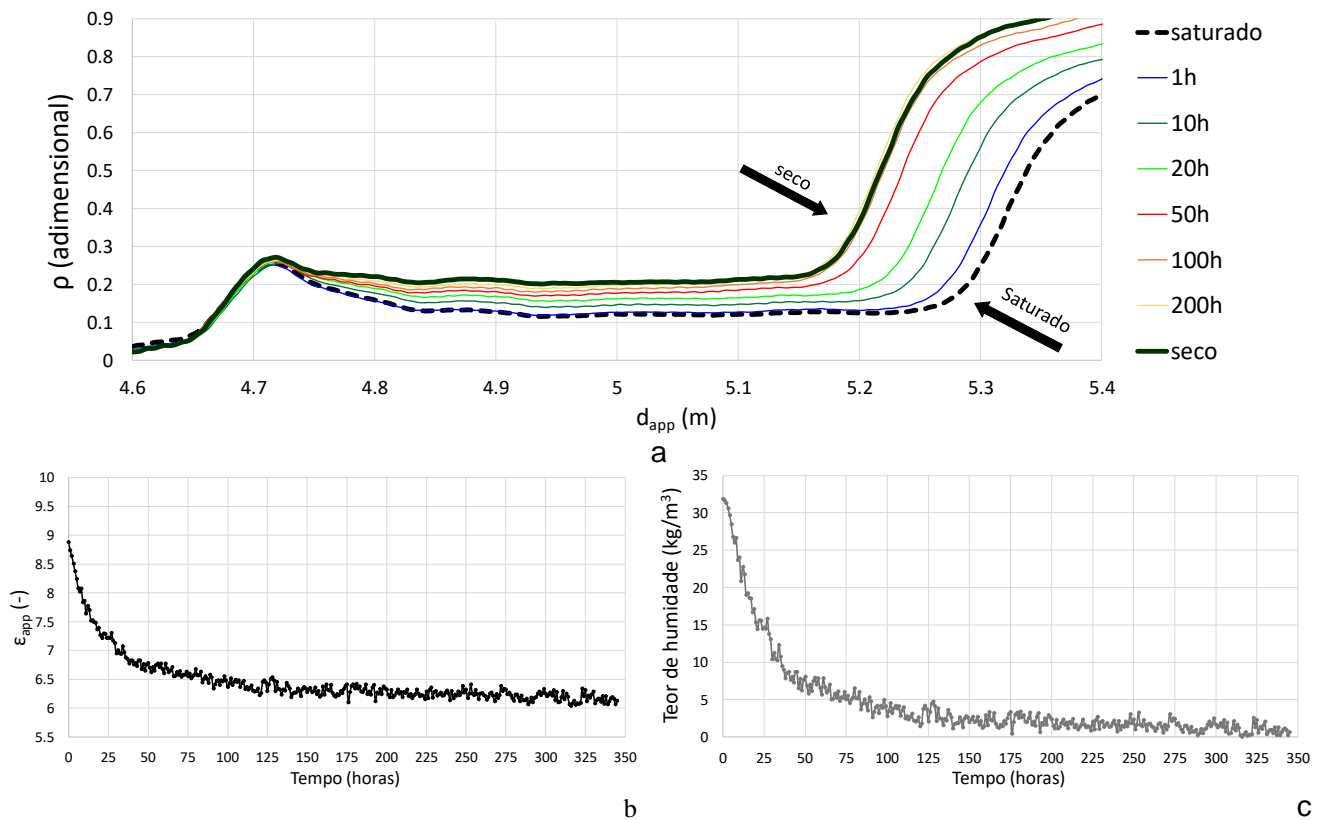


Figura 2: Resultados obtidos durante a secagem de uma amostra de pedra calcária a) reflectogramas medidos durante o ensaio de secagem; b) evolução da permissividade dielétrica relativa, ϵ_{app} , durante o período de secagem; c) evolução do teor de humidade, $w(kg/m^3)$, durante o período de secagem

Na Figura 2 b) apresentam-se os valores da permissividade dielétrica relativa, ϵ_{app} , do material ao longo do ensaio (passo 4 da Figura 1), os quais vão diminuindo à medida que a pedra calcária vai secando. A diferença entre o valor de ϵ_{app} medido com a pedra completamente saturada ($\epsilon_{app} \approx 8.8$) e seca ($\epsilon_{app} \approx 6.1$) depende da porosidade do material. Para materiais muito porosos esse intervalo será maior. Finalmente, com os valores de ϵ_{app} calculados e com a curva de calibração obtida gravimetricamente é possível quantificar o teor de humidade ao longo do ensaio (Figura 2 c)).

Conclusões

Monitorizar o teor de humidade em materiais de construção é uma tarefa complexa e que é ainda objeto de investigação por parte da comunidade científica. A técnica Time-Domain Reflectometry (TDR) é amplamente utilizada em diversos domínios, nomeadamente na medição do teor de humidade dos solos, mas a sua aplicação em materiais de construção consolidados é ainda pouco frequente e inovadora. A falta de sensores TDR adequados, as dificuldades na sua instalação, a inexistência de curvas de calibração apropriadas e a necessidade de desenvolver ferramentas automáticas para processamento do sinal são considerados os maiores obstáculos à utilização da técnica em materiais de construção. Neste trabalho foi proposta uma metodologia composta por seis etapas principais, com o intuito de clarificar sinteticamente como ultrapassar os referidos obstáculos e proporcionar medições bem-sucedidas do teor de humidade com o método TDR (Figura 1). Ao contrário dos materiais altamente porosos onde a técnica já foi testada, a metodologia desenvolvida foi aplicada a uma amostra de pedra calcária. Os resultados obtidos são compatíveis com o expectável para um processo de secagem, tendo a técnica demonstrado ser capaz de monitorizar variações do teor de humidade neste material, apesar da sua baixa porosidade (Figura 2). No futuro,

pretende-se aplicar a sequência de procedimentos propostos para monitorizar o teor de humidade em paredes de pedra calcária à escala real, bem como encorajar novos desenvolvimentos que potenciem uma utilização mais generalizada da técnica e a tornem mais apelativa para a prática profissional.

Agradecimentos

A primeira autora agradece o apoio financeiro concedido pela FCT, por intermédio da bolsa de doutoramento SFRH/BD/121549/2016.

Este trabalho foi apoiado financeiramente por: Financiamento Base – UIDB/04708/2020 e Financiamento Programático – UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções, financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC); Projeto CLING – Orientações para o projeto de edifícios baseadas nas alterações climáticas – financiado por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC), no âmbito do projeto PTDC/EME-REN/3460/2021.

Referências

- [1] S. E. Pinchin, *Techniques for monitoring moisture in walls*, *Studies in Conservation*, 53, no. sup2 (2008) 33-45.
- [2] M. C. Phillipson *et al.*, *Moisture measurement in building materials: An overview of current methods and new approaches*, *Building Services Engineering Research and Technology*, 28, no. 4 (2007) 303-316, 2007, doi: 10.1177/0143624407084184.
- [3] A. Cataldo, G. Cannazza, E. De Benedetto, L. Tarricone, and M. Cipressa, *Metrological assessment of TDR performance for moisture evaluation in granular materials*, *Measurement*, 42, no. 2 (2009) 254-263, doi: 10.1016/j.measurement.2008.06.006.
- [4] H. He *et al.*, *A review of time domain reflectometry (TDR) applications in porous media*, *Advances in Agronomy*, 168 (2021) 83-155, doi: 10.1016/bs.agron.2021.02.003.
- [5] A. Scheuermann, C. Huebner, S. Schlaeger, N. Wagner, R. Becker, and A. Bieberstein, *Spatial time domain reflectometry and its application for the measurement of water content distributions along flat ribbon cables in a full-scale levee model*, *Water Resources Research*, 46, no. 4 (2009), doi: 10.1029/2008WR007073.
- [6] L. Fiala, M. Pavlíková, and Z. Pavlík, *Application of TDR method for moisture profiles measurement in cellular concrete*, in *1st International Doctoral Conference and Advanced Materials*, 23-25 July 2014, 11-15, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.982.11.
- [7] Z. Suchorab, *Monitoring of capillary rise phenomenon in calcium silicate board using the surface TDR probes set*, *Proceedings of ECOpole*, 8, no. 1 (2014) 82-86, doi: 10.2429/proc.2014.8(1)010.
- [8] A. Cataldo, Egidio De Benedetto, Giuseppe Cannazza, E. Piuzzi, and E. Pittella, *Moisture content monitoring of construction materials: From in-line production through on-site applications*, in *2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Torino, Italy, 22-25 May 2017, 1-5, doi: 10.1109/I2MTC.2017.7969762.
- [9] L. Mollo and R. Greco, *Moisture measurements in masonry materials by time domain reflectometry*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 23, no. 4 (2011) 441-444, doi: 10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000188.
- [10] Laboratory TDR probe. Easy-Test, <https://www.e-test.eu/laboratory-tdr-probe.html>, accessed 04/07/2022.
- [11] Field TDR probe. East-Test, <https://www.e-test.eu/field-tdr-probe.html>, accessed 07/04/2022).

- [12] CS616: 30 cm Water content reflectometer. Campbell Scientific, <https://www.campbellsci.com.br/cs616-reflectometer>, accessed 07/04/2022.
- [13] H. Sobczuk, Polish Patent No. 198492 B1, 30 June 2008.
- [14] Z. Pavlík, M. Pavlíková, L. Fiala, R. Černý, H. Sobczuk, and Z. Suchorab, *Application of time-domain reflectometry method for measuring moisture content in porous building materials*, Trends in Applied Sciences Research, 2, no. 3 (2007) 188-200.
- [15] M. C. Phillipson, P. H. Baker, M. Davies, Z. Ye, G. H. Galbraith, and R. C. McLean, *Suitability of time domain reflectometry for monitoring moisture in building materials*, Building Services Engineering Research and Technology, 29, no. 3 (2008) 261-272, doi: 10.1177/0143624408092423.
- [16] Z. Pavlík, L. Fiala, and R. Černý, *Analysis of dielectric mixing models for the moisture assessment of porous building materials*, Pollack Periodica, 4, no. 2 (2009) 79-88, doi: 10.1556/Pollack.4.2009.2.8.
- [17] Z. Pavlík, J. Mihulka, L. Fiala, and R. Černý, *Application of Time-Domain Reflectometry for measurement of moisture profiles in a drying experiment*, International Journal of Thermophysics, 33, no. 8-9 (2012) 1661-1673, doi: 10.1007/s10765-011-1020-0.
- [18] T. Stingl Freitas, A. Sofia Guimarães, S. Roels, V. Peixoto De Freitas, and A. Cataldo, *Time Domain Reflectometry (TDR) technique - A solution to monitor moisture content in construction materials*, in E3S Web of Conferences, 2020, 172, doi: 10.1051/e3sconf/202017217001.
- [19] T. S. Freitas, A. S. Guimarães, S. Roels, V. P. de Freitas, and A. Cataldo, *Is the time-domain reflectometry (TDR) technique suitable for moisture content measurement in low-porosity building materials?*, Sustainability (Switzerland), 12, no. 19 (2020) 7855, doi: 10.3390/SU12197855.

Caracterização Multi-Performance de uma Casa Modular em Madeira

DELGADO João M.P.Q.^{1,a}, ALMEIDA Ricardo^{1,2,b}, MATOS Ana Mafalda^{1,c},
BARREIRA Eva^{1,d} e GUIMARÃES Ana S.^{1,e}

¹ CONSTRUCT, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n; 4200-465 Porto, Portugal

² Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Viseu, Campus Politécnico, 3504-510 Viseu, Portugal

^ajdeldgado@fe.up.pt, ^bralmeida@estgv.ipv.pt, ^canamatos@fe.up.pt, ^dbarreira@fe.up.pt,
^eanasofia@fe.up.pt,

Palavras-chave: Construção modular em madeira, Monitorização, Conforto térmico, Eficiência energética.

Resumo. Apesar de não ser um conceito novo, a construção modular tem sido alvo de crescente interesse e investimento nos últimos anos. Os sistemas construtivos modulares em madeira apresentam vantagens económicas e ambientais, pois a madeira é uma matéria-prima natural e localmente disponível, para além de apresentar propriedades térmicas interessantes. Neste contexto, o Projecto BlueWoodenHouse, numa abordagem integrada entre a Ciência e a Indústria, visa, entre outros objetivos, caracterizar as soluções, sistemas e materiais utilizados numa moradia unifamiliar de construção modular em madeira, bem como monitorizar a concentração de CO₂ e os parâmetros higrotérmicos da mesma em plena utilização. A moradia tem três ocupantes, três quartos e uma área de 190 m². Inicialmente, foi realizado um levantamento e caracterização dos materiais e soluções construtivas utilizados, nomeadamente nas paredes, pavimento e cobertura. Os dados obtidos na monitorização higrotérmica (temperatura e humidade relativa) foram analisados e avaliou-se o conforto térmico interior.

Introdução

Nos últimos anos, a dinâmica em torno da construção de edifícios modulares tem aumentado significativamente, despertando o interesse de potenciais compradores e investidores. Comparando com os métodos tradicionais de construção, a construção modular apresenta várias vantagens, tais como: menores necessidades de mão de obra no estaleiro, maior rapidez e segurança nos processos construtivos, os processos construtivos são mais ecológicos e amigos do ambiente, e o planeamento da obra é mais previsível, permitindo minimizar o desperdício de recursos [1-4].

A construção modular não é um conceito novo, tem já sido amplamente utilizada em vários países, tais como os EUA, Japão, Reino Unido e Suécia, e tornou-se bastante popular na China, Hong Kong, Austrália, Alemanha e Holanda. Vários exemplos de edifícios modulares aparecem descritos na literatura sob a forma de pequenos alojamentos turísticos, hotéis, escolas, residências estudantis, habitação social, hospitais, escritórios e apartamentos [5-7].

Por outro lado, vários estudos têm demonstrado que em situações de défice habitacional, em que a pressão por novas construções é elevada, o sistema construtivo modular, por ser mais rápido, é mais eficiente na resposta às necessidades globais, quando comparado com os métodos construtivos tradicionais [8]. Outro aspeto importante é a crescente preocupação e exigência no domínio da sustentabilidade na construção civil, fundamental para reduzir os impactos económicos, ambientais e sociais. A construção tradicional de edifícios é responsável por mais de 30% da produção de resíduos, consumo de energia e emissões de dióxido de carbono [9]. Mais detalhadamente, os resíduos de construção são responsáveis por aproximadamente 20% de todos os resíduos existentes nos aterros sanitários, podendo chegar a mais de 50% em países tais como os EUA e Reino Unido [11,12].

No entanto, apesar das inúmeras vantagens da construção modular, a sua aceitação é ainda limitada e o setor da construção continua a preferir o método tradicional de construção assente em alvenarias de tijolo e estruturas porticadas de betão armado. Esta preferência é ainda mais evidente nos países mediterrânicos, e particularmente em Portugal, onde a arquitetura vernacular se baseia numa construção pesada onde a inércia térmica desempenha uma papel crucial. Contudo, os novos hábitos de utilização e ocupação dos edifícios, associados a envolventes cada vez mais isoladas, podem ser compatíveis com soluções construtivas mais leves, como as que se encontram na construção modular.

Neste trabalho, pretende-se contribuir para o melhor conhecimento do desempenho em serviço de construções modulares em madeira, usando como caso de estudo uma habitação unifamiliar, construída no concelho de Esposende.

Metodologia de Monitorização

Caso de estudo. O caso de estudo é uma moradia unifamiliar fabricada pela empresa líder do consórcio do projeto BlueWoodenHouse (<http://bluewoodenhouse.com/>). Trata-se de uma moradia de tipologia T3, localizada no concelho de Esposende, com uma área coberta de 190 m², em plena utilização, isto é, habitada por uma família de 3 pessoas (2 adultos e 1 criança). De realçar, que as fontes de energia associadas a esta moradia são: i) Gás: uso culinário; ii) AVAC: aquecimento e arrefecimento de espaços (5 equipamentos: sala, cozinha e quartos); iii) Bomba de calor: aquecimento de águas sanitárias; iv) 100 euros fatura de energia elétrica (estimativa).



Figura 1: Caso de estudo: Moradia unifamiliar.

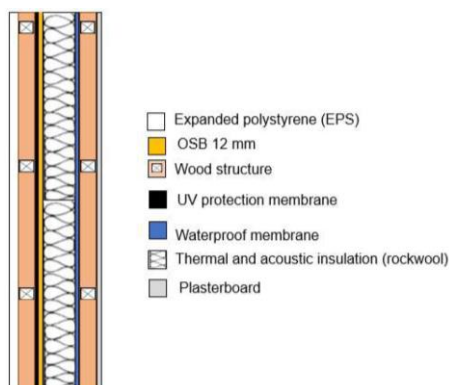


Figura 2: Composição da parede (sistema A)

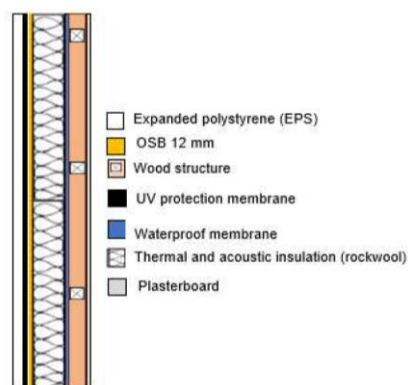


Figura 3: Composição da parede (sistema B)

Os materiais e soluções construtivas do caso de estudo são descritos de seguida. As paredes exteriores são formadas por uma estrutura de perfis de madeira, com placas de OSB, criando uma composição capaz de resistir a cargas verticais e perpendiculares, transmitindo-as à fundação. As placas OSB tem uma espessura de 12 mm de OSB. Existem dois tipos de sistemas. Na parede externa tipo A entre as estruturas de madeira são aplicados os demais materiais: na face externa, poliestireno expandido como acabamento externo, seguida de uma membrana de proteção UV, placa OSB 12 mm, lã de rocha como isolamento térmico e acústico, uma membrana impermeável e gesso cartonado como acabamento interno (ver Figura 2). Na parede exterior tipo B, a estrutura de

madeira está localizada após a membrana impermeável (ver Figura 3). A localização das paredes está presente na Figura 7.

O piso está em contato com o solo e é composto por uma base de betão, seguida de madeira CL4 (classe de risco 4), uma manga plástica, lã de rocha, OSB e soalho flutuante (ver Figura 4).

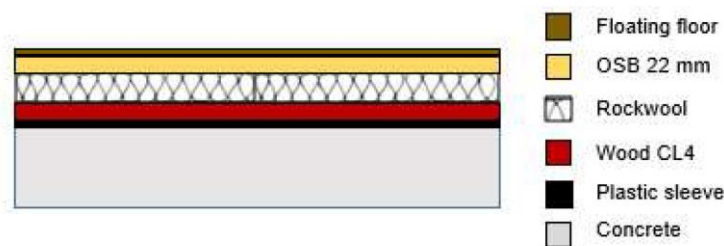


Figura 4: Solução construtiva do pavimento da moradia em estudo

A cobertura é plana e não acessível. Na sua constituição existe uma primeira camada de seixos, seguido por uma camada de PVC impermeável, OSB de 22 mm, zona de ventilação, proteção respirável, lã de rocha, uma barreira de vapor, e como acabamento interior um sistema de teto falso. Além do mencionado, a cobertura também possui uma platibanda (ver Figura 5).

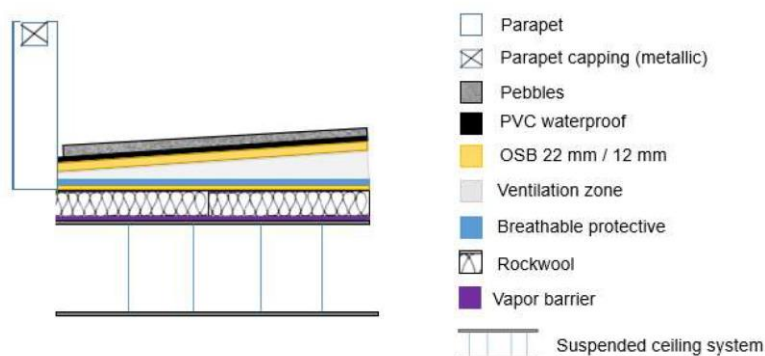


Figura 5: Solução construtiva da cobertura da moradia em estudo.

Como se pode verificar os materiais de isolamento térmico e acústico preferidos foram a lã de rocha (Rockwool) e poliestireno expandido (EPS). Foram recolhidas amostras de lã de rocha (espessura de 100 mm) e de EPS (espessuras de 30 e 40 mm) junto da empresa e realizados vários ensaios de caracterização. No que se refere à condutividade térmica, foi realizado o ensaio de acordo com a norma DIN EN 12667 e obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Resultados de condutividade térmica

	Dimensão dos provetes (mm ³)	Condutividade térmica (W/(m ² K))	Condutividade térmica média (W/(m ² K))
EPS	300x300x40	0.0352	0.0367
		0.0367	
		0.0382	
Lã de rocha	300x300x50	0.0336	0.0349
		0.0348	
		0.0364	

Equipamentos e plano de monitorização. O plano de monitorização é composto equipamentos capazes de medira temperatura, humidade relativa (HR) e concentração de CO₂ (ppm), nomeadamente: i) 7 sensores do Tipo HOBO MX CO₂ distribuídos por diferentes divisões da moradia (cozinha, sala, suite, wc suite, quarto 1, quarto 2, wc serviço), para medição de temperatura, HR e CO₂ e aquisição a cada 15min; ii) 1 Gateway que permite a monitorização em tempo real dos HOBO MX CO₂, ver Figura 6, através da aplicação HOBOLink. No exterior foi colado um sensor do tipo HOBO UX100 (temperatura, HR), com aquisição a cada 15 min, contudo, não permite a monitorização em tempo real e apenas se utiliza para controlar de algum modo as condições externas. A Figura 7 apresenta a planta da moradia bem como a localização da instrumentação e dos equipamentos de AVAC. A instrumentação, tanto quanto possível, foi colocada fora da área de influência direta dos equipamentos de AVAC. Na Figura 8 são

apresentados, a título de exemplo, os resultados decorrentes da monitorização em tempo real do caso de estudo.

A monitorização teve início em Novembro de 2021 e neste trabalho apresenta-se uma análise dos dados (temperatura, HR e CO₂) obtidos entre Dezembro de 2021 e Junho de 2022. Adicionalmente fez-se uma análise do conforto térmico nessa mesma janela temporal.



Figura 6: Equipamentos de monitorização

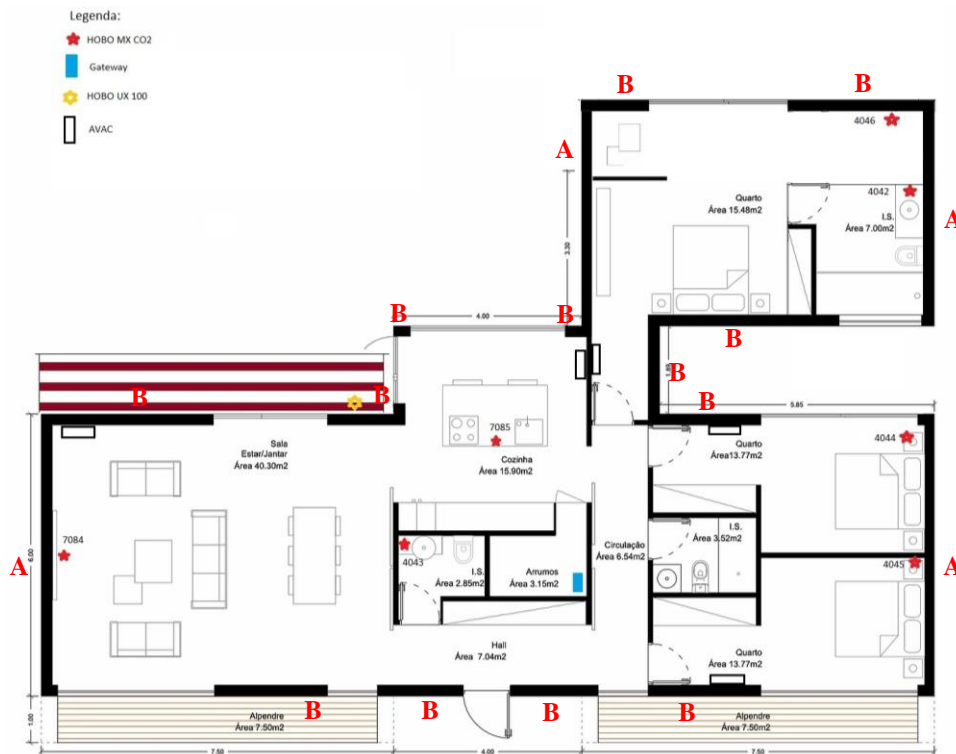


Figura 7: Planta da moradia em estudo e localização dos sensores HOBO MX CO₂, Gateway, HB UX 100, bem como dos equipamentos AVAC.

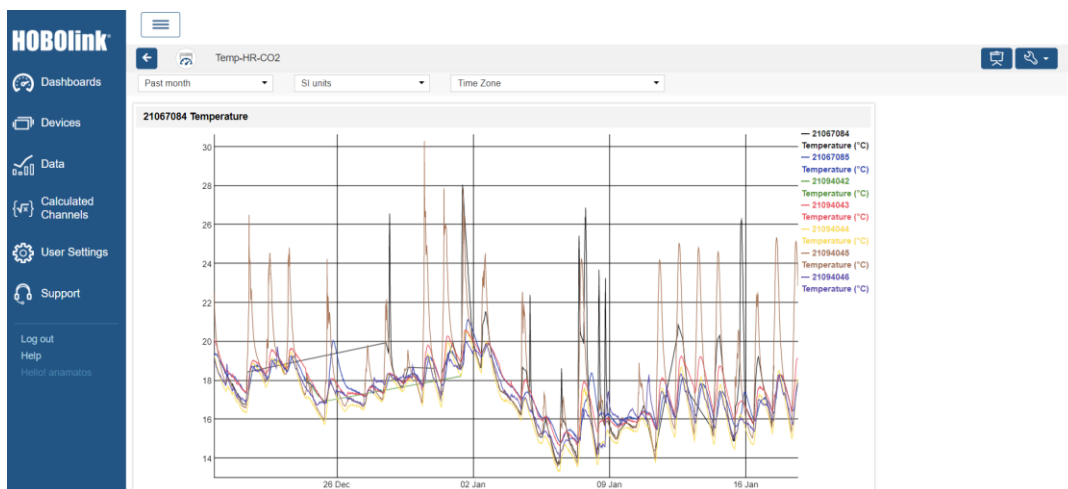


Figura 8: Monitorização em tempo real através do HOBOLink.

Resultados e Discussão

Temperatura e Humidade Relativa. A Figura 9 ilustra os perfis de temperatura (T) e de humidade relativa (HR) do ar medidos no interior da sala, do quarto e da cozinha, sendo possível a comparação com os respetivos perfis do ar exterior.

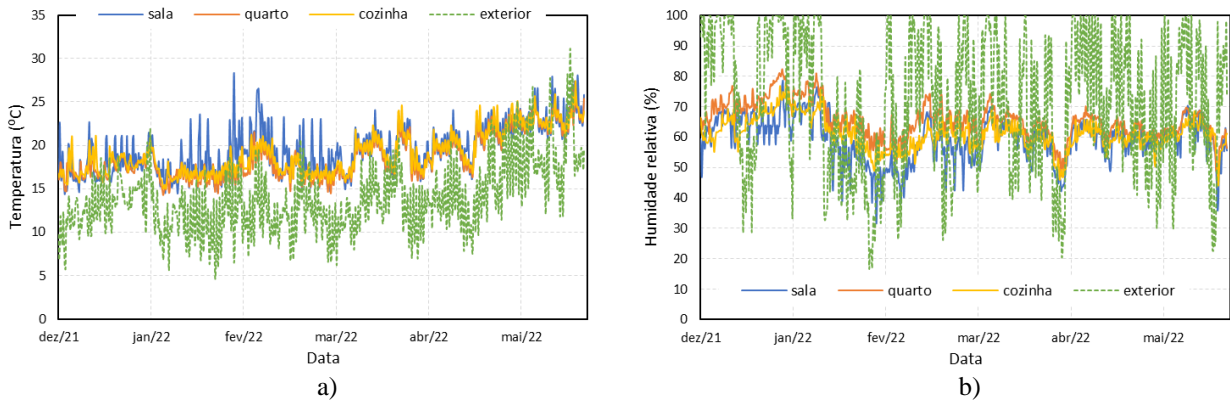


Figura 9: a) Perfis de temperatura; b) perfis de humidade

Analisando os resultados é possível observar um claro alinhamento entre as condições de temperatura exterior e interior ao longo de todo o período de monitorização. É ainda possível observar que genericamente a temperatura no interior dos compartimentos é muito próxima, identificando-se, pontualmente, momentos em que a temperatura no interior da sala é mais alta. Estes momentos ocorrem principalmente nos meses de inverno e provavelmente correspondem a situações de ocupação do espaço com possível recurso a sistemas de aquecimento.

A variação da humidade relativa, como seria expectável, apresenta um padrão mais heterogéneo, mas dentro de intervalos habitualmente considerados como adequados ao ambiente interior.

Para facilitar a interpretação dos resultados e para evidenciar o impacto do clima exterior, considerou-se pertinente analisar os resultados separadamente por mês de monitorização. Desta análise resultaram as representações sob a forma de box-plot da Figura 10.

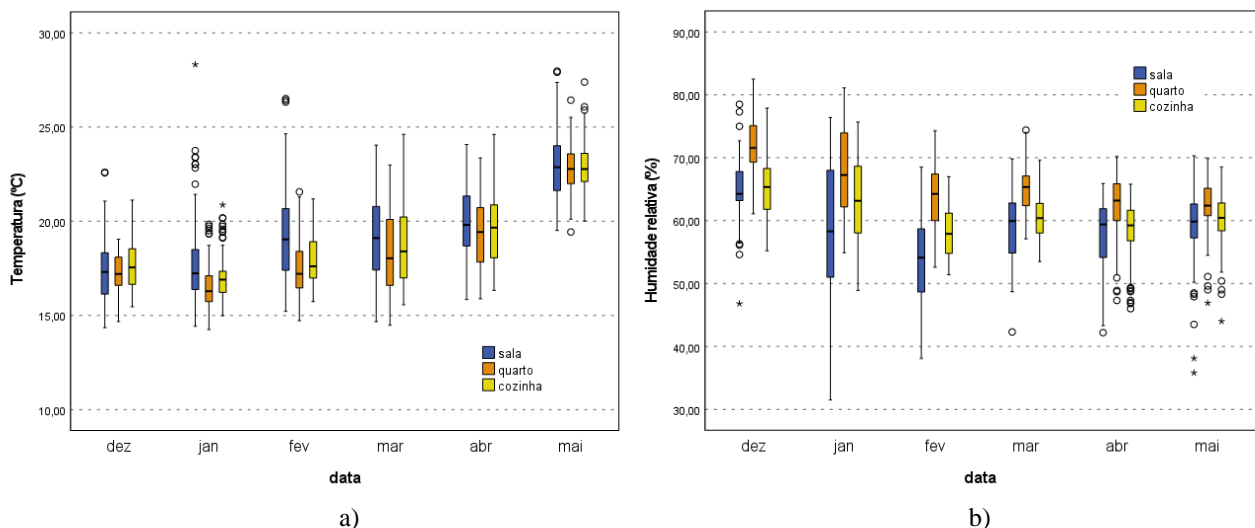


Figura 10: Box-plot dos registos mensais no interior dos compartimentos: a) temperatura; b) humidade relativa

A Figura 10a) mostra que houve um aumento claro da temperatura interior no mês de maio, onde a temperatura média foi superior a 22 °C nos três compartimentos, enquanto nos restantes meses este valor foi sempre inferior a 20 °C. Comparando o desempenho dos três compartimentos, confirma-se que nos meses de janeiro e fevereiro a temperatura média no interior da sala foi superior. Adicionalmente verifica-se que a sua variabilidade também é superior, ocorrendo até alguns *outliers* associados a picos atípicos de temperatura, sugerindo a utilização pontual de sistemas de aquecimento neste compartimento.

A Figura 10b) evidencia uma tendência de decréscimo da humidade relativa interior ao longo dos meses de monitorização. A humidade relativa média mensal está dentro do intervalo de 50 a 75%. Apenas pontualmente ocorrem valores de humidade relativa superiores a 80% (no quarto, nos meses de dezembro e janeiro). Comparando os compartimentos, a sala apresenta de forma consistente valores mais baixos e os valores elevados ocorrem no quarto.

Concentração de CO₂. A Figura 11a) ilustra o perfil da concentração de CO₂ medida no interior dos três compartimentos ao longo do período de ensaio. A Figura 11b) mostra a respetiva distribuição de probabilidade acumulada.

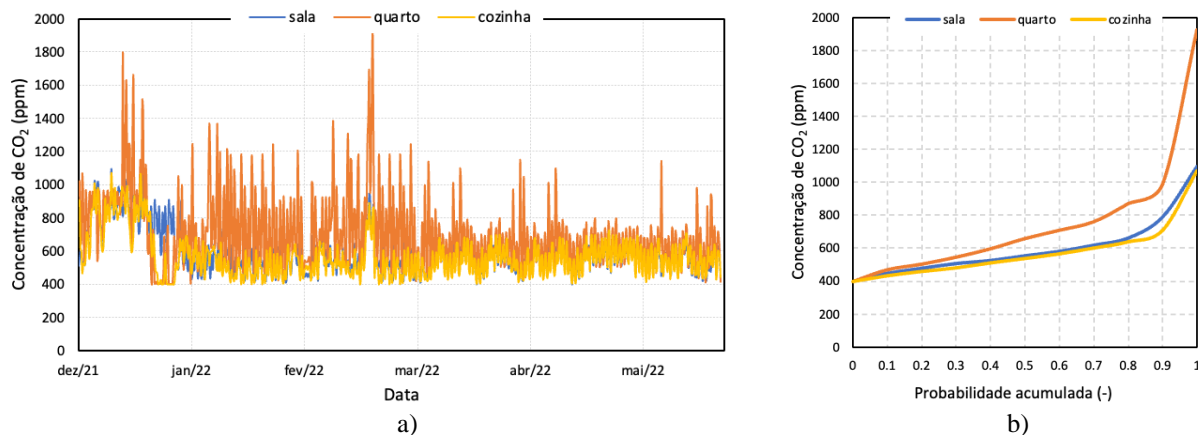


Figura 11: a) Perfis de concentração de CO₂; b) distribuição de probabilidade acumulada

Os resultados mostram um comportamento muito semelhante na sala e na cozinha. Nestes espaços a concentração de CO₂ nunca ultrapassou os 1200 ppm e só foi superior a 1000 ppm em cerca de 3% do período de monitorização. Estes valores indicam que as condições de ventilação destes espaços são adequadas. No caso do quarto, a concentração de CO₂ apresentou alguns picos, correspondentes ao período noturno. A concentração máxima registada foi inferior a 2000 ppm e em 10% do tempo, a concentração ultrapassou os 1000 ppm.

Estes valores sugerem a necessidade de continuar a monitorizar este parâmetro e de, eventualmente, ajustar a estratégia de ventilação do quarto durante o período noturno. Nos restantes compartimentos, a concentração de CO₂ aponta para taxas de renovação de ar adequadas.

Conforto térmico. Nesta secção apresenta-se uma avaliação do conforto térmico com base nos registos de temperatura no interior e no exterior da habitação. A avaliação de conforto térmico foi realizada tendo por base o modelo adaptativo proposto pela norma EN 16798-2 [13], que define os limites de temperatura operativa que conduzem ao conforto térmico em função da temperatura média exponencialmente ponderada do ar exterior. Neste contexto, considerou-se que a temperatura do ar é uma boa aproximação da temperatura operativa, uma vez que a velocidade do ar é baixa e não existem efeitos radiativos relevantes. A Figura 12 mostra a representação dos registos de temperatura e dos limites de conforto, separadamente para cada compartimento e considerando que o edifício é da categoria II (*normal level of expectation*).

Para facilitar a interpretação dos resultados, foi calculada percentagem de tempo em desconforto em cada compartimento, obtendo-se 50.1% na sala, 66.5% no quarto e 60.4% na cozinha. Estes valores, aparentemente preocupantes, devem ser enquadrados no contexto de utilização do edifício, uma vez que o período de ocupação dos compartimentos é claramente limitado e certamente a grande maioria dos registos de desconforto correspondem a períodos sem ocupação dos compartimentos. O próximo passo nesta investigação será então a identificação dos períodos com ocupação e posterior correlação com os resultados da aplicação dos modelos de conforto térmico.

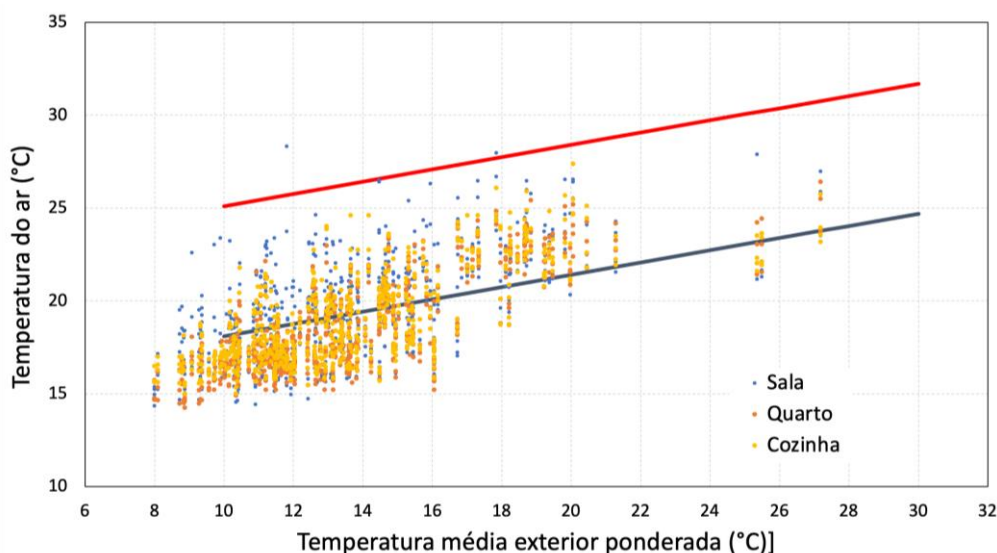


Figura 12: Avaliação do conforto térmico através do modelo adaptativo da EN 16798-2.

Conclusão

Neste trabalho são apresentados os resultados preliminares de uma extensa campanha de monitorização desenvolvida no âmbito do projeto BlueWoodenHouse. A análise dos resultados mostrou que:

- existe um claro alinhamento entre as condições de temperatura exterior e interior ao longo de todo o período de monitorização;
- o recurso ao sistema de aquecimento ocorreu de forma intermitente e pontual, em compartimentos específicos, provavelmente como resposta imediata a situações de desconforto térmico;
- a monitorização da concentração de CO₂ aponta para taxas de renovação de ar adequadas, exceto em alguns períodos no quarto, durante o período noturno;
- a aplicação do modelo adaptativo de conforto proposto pela norma EN 16798-2 resultou numa percentagem de tempo em desconforto de 50.1% na sala, 66.5% no quarto e 60.4% na cozinha. No entanto, grande parte destes períodos podem corresponder a momentos em que não existe ocupação destes espaços.

Agradecimentos

O trabalho resulta do Projeto de Investigação “BlueWoodenHouse”, com a referência POCI-01-0247-FEDER-047157, co-financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (ERDF) por meio do Programa Operacional de Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), no âmbito do acordo de parceria Portugal 2020. Além disso, este trabalho foi apoiado financeiramente por: Financiamento Base - UIDB/04708/2020, Financiamento Programático - UIDP/04708/2020 (CONSTRUCT), financiados por fundos nacionais através do FCT/MCTES (PIDDAC); e pela FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia através do Estímulo ao Emprego Científico Individual 2020.00828.CEECIND e 2021.01765.CEECIND.

Referências

- [1] W. Ferdous, Y. Bai, T.D. Ngo, A. Manalo, P. Mendis, *New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings – A state-of-the-art review*, Engineering Structures 183 (2019) 883–893
- [2] A.W. Lacey, W. Chen, H. Hao, K. Bi, *Structural response of modular buildings – an overview*, Journal of Building Engineering, 16 (2018) 45–56.

- [3] C. Kasperzyk, M.-K. Kim, I. Brilakis, *Automated re-prefabrication system for buildings using robotics*, *Automation in Construction*, 83 (2017) 184–195.
- [4] N. Boyd, M.M.A. Khalfan, T. Maqsood, *Off-site construction of apartment buildings*, *Journal of Architectural Engineering*, 19 (2013) 51–57.
- [5] A. Fathieh, O. Mercan, *Seismic evaluation of modular steel buildings*, *Engineering Structures*, 122 (2016) 83–92.
- [6] L.J. Fifield, K.J. Lomas, R. Giridharan, D. Allinson, *Hospital wards and modular construction: summertime overheating and energy efficiency*, *Building and Environment*, 141 (2018) 28–44.
- [7] D.A. Steinhardt, K. Manley, *Adoption of prefabricated housing—the role of country context*, *Sustainable Cities and Society*, 22 (2016) 126–135.
- [8] S. Srisangeerthan, M.J. Hashemi, P. Rajeev, E. Gad, S. Fernando, *Numerical study on the effects of diaphragm stiffness and strength on the seismic response of multi-story modular buildings*, *Engineering Structures*, 163 (2018) 25–37.
- [9] O. Pons, *Assessing the sustainability of prefabricated buildings*, *Eco-efficient Construction and Building Materials*, (2014) 434-456.
- [10] Y. Li, X. Zhang, *Web-based construction waste estimation system for building construction projects*, *Automation in Construction*, 35 (2013) 142-156.
- [11] Lee W-h, Kim K-w, Lim S-h, *Improvement of floor impact sound on modular housing for sustainable building*, *Renewable & Sustainable Energy Reviews* 29 (2014) 263-275.
- [12] [V.W.Y. Tam, X.F. Gao, C.M. Tam, C.H. Chan, *New approach in measuring water absorption of recycled aggregates*, *Construction and Building Materials*, 22 (2008) 364-369
- [13] EN 16798-2, *Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 2: Interpretation of the requirements in EN 16798-1 - Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics*, CEN - European Committee for Standardization (2019).

Simulação dinâmica do desempenho energético de um envidraçado termocrómico nos principais climas da Europa

TEIXEIRA Henriqueta^{1, a}, GOMES M. Glória^{1, b}, RODRIGUES A. Moret^{1, c} e
AELENEI Daniel^{2, d}

¹ CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos (DECivil), Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal

² UNINOVA, Departamento de Engenharia Civil (DEC), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 2829-516, Caparica, Portugal

^a henriqueta.teixeira@tecnico.ulisboa.pt, ^b maria.gloria.gomes@tecnico.ulisboa.pt,
^c moret.rodriques@tecnico.ulisboa.pt, ^d aelenei@fct.unl.pt

Palavras-chave: Envidraçado termocrómico, Desempenho energético, Simulação dinâmica.

Resumo. Os edifícios com grandes áreas envidraçadas tendem a apresentar trocas térmicas significativas que resultam em elevadas necessidades energéticas para climatização. Os envidraçados termocrómicos são uma tecnologia inovadora de envidraçados que alteram de forma dinâmica e reversível as suas propriedades térmicas e óticas de acordo com a sua temperatura, promovendo a mitigação de ganhos térmicos e o estabelecimento de condições de conforto interior e eficiência energética. O presente estudo tem como objetivo analisar o desempenho energético de um envidraçado termocrómico instalado num gabinete. Foi utilizado um modelo de simulação dinâmica, anteriormente calibrado com dados experimentais, para analisar o desempenho energético anual do vidro termocrómico (12+12+6mm) comparativamente ao de um envidraçado convencional incolor com e sem uma película refletora de controlo solar (6+12+4mm). As necessidades energéticas (aquecimento e arrefecimento) e o consumo energético (aquecimento, arrefecimento e iluminação artificial) foram obtidos para as diferentes soluções de envidraçados nas cidades de Lisboa, Londres e Berlim (representativas dos principais climas da Europa). Com o envidraçado termocrómico obteve-se uma redução significativa, até 70%, das necessidades energéticas para arrefecimento. Apesar do comportamento dinâmico do envidraçado termocrómico e da diminuição das condições de iluminação natural do gabinete, foi possível obter uma redução do consumo total energético até 50%.

Introdução

Devido a razões estéticas e/ou de otimização de utilização de iluminação natural, as fachadas com elevada área envidraçada têm-se tornado um elemento comum em edifícios novos nos últimos anos, particularmente em edifícios de serviços [1]. Os envidraçados, comparativamente aos elementos opacos, são responsáveis por significativas trocas de calor entre os ambientes interior e exterior devido à sua elevada transmitância, originando necessidades energéticas para climatização significativas [2].

A utilização, isolada ou simultânea, de diferentes soluções de controlo solar, como estores, portadas, palas e películas para vidros melhora o desempenho dos envidraçados. As películas de controlo solar, compostas por várias camadas de poliéster e adesivos com absorção de radiação ultravioleta, permitem melhorar o desempenho ao alterarem as propriedades óticas e térmicas do sistema envidraçado utilizado como substrato [3], [4]. Apesar deste tipo de películas existir no mercado com uma grande variedade de propriedades e de tipos de instalação, têm como limitação o facto de apresentarem um comportamento estático que não lhes confere a possibilidade de se adaptarem às condições ambientais.

Assim, têm vindo a surgir e a ser investigadas tecnologias inovadoras com o objetivo de melhorar o desempenho dos envidraçados sob diferentes condições ambientais e de equilibrar diferentes requisitos de desempenho numa única solução de envidraçado [5].

Os envidraçados termocrómicos [6], enquanto solução inovadora de envidraçados passivos, reagem a um estímulo térmico e alteram autonomamente as suas propriedades térmicas e óticas devido à presença de um material termocrómico (TC) laminado. A alteração das propriedades ocorre quando o material TC atinge temperaturas superiores ou inferiores a valores de transição específicos do material em questão, provocando uma reação química que de forma reversível aumenta ou diminui o escurecimento do vidro, respetivamente. O comportamento dinâmico desta solução de envidraçados permite regular os ganhos solares e de iluminação natural de forma autónoma, adaptando as propriedades do envidraçado às condições ambientais. No entanto, este tipo de envidraçado tem como desvantagem a possibilidade de não ser atingida a temperatura necessária à transição cromática e, assim, não ser ativado o comportamento dinâmico.

Estudos anteriores [7-14] que avaliam numericamente o desempenho energético de envidraçados termocrómicos concluem que este tipo de envidraçado promove a redução do consumo e pico energéticos comparativamente a um envidraçado incolor convencional. Esta redução é mais notória considerando climas quentes com níveis de radiação solar elevados. A maioria dos estudos anteriores [8-12] analisa envidraçados termocrómicos teóricos ou em fase de protótipo, avaliando o seu desempenho energético através de modelos numéricos de edifícios tipo. O presente estudo pretende complementar a investigação existente ao analisar o desempenho energético de um envidraçado termocrómico disponível no mercado através da simulação da sua instalação num gabinete sob os principais climas da Europa.

Metodologia

A metodologia adotada no presente estudo encontra-se esquematizada na Figura 1. Um gabinete individual, localizado em Lisboa, foi utilizado como caso de estudo para a avaliação numérica do desempenho energético de um envidraçado duplo TC comparativamente a duas soluções de envidraçados estáticos (envidraçado incolor com e sem película refletora de controlo solar).

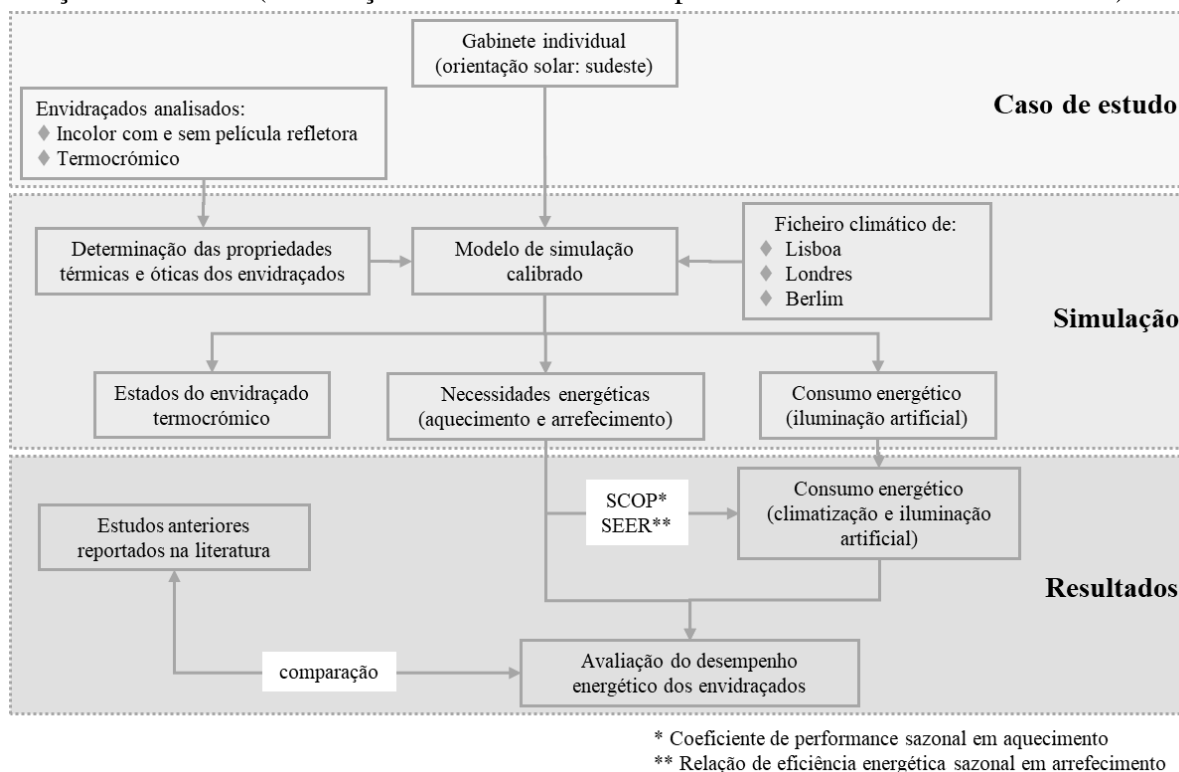


Figura 1: Metodologia adotada no presente estudo.

As propriedades térmicas e óticas dos envidraçados foram determinadas com recurso aos programas Optics [15] e Window [16]. Em paralelo, foi também desenvolvido um modelo de simulação energética do gabinete em EnergyPlus, anteriormente calibrado com dados experimentais [17], para estimar as necessidades energéticas anuais (aquecimento e arrefecimento) e o consumo energético anual (climatização e iluminação artificial), em kWh/m² (m² de área de pavimento), do gabinete na presença das várias soluções de envidraçados. Foram considerados os ficheiros climáticos representativos dos principais tipos de climas na Europa (clima temperado com verão quente e seco – Lisboa; clima temperado oceânico – Londres; clima continental de verão fresco – Berlim) para estudar a influência do clima no comportamento dinâmico do envidraçado termocrómico.

Caso de estudo. O gabinete do caso de estudo situa-se no último piso de um edifício universitário do Instituto Superior Técnico (Figura 2), Lisboa, e apresenta uma área de pavimento de, aproximadamente, 19m² e uma área de envidraçado orientada a sudeste de, aproximadamente, 10.38m² (rácio de envidraçado de 81%). Estores venezianos de lâminas metálicas horizontais instalados no interior do gabinete atuam como dispositivos de sombreamento. A climatização do gabinete é realizada por um sistema de ar-condicionado (relação de eficiência energética sazonal em arrefecimento: 7.98; coeficiente de performance sazonal em aquecimento: 4.43) controlado pelo ocupante e com um intervalo de temperatura pré-definido (22 ± 2°C). O gabinete é iluminado artificialmente por um candeeiro de teto (110 W).

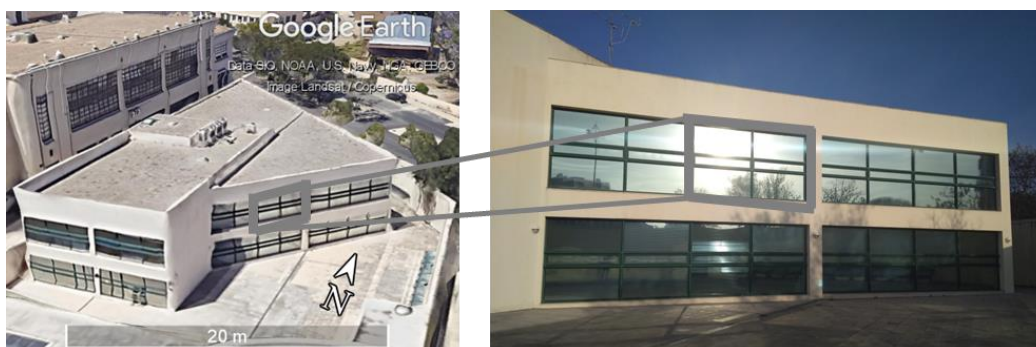


Figura 2: Identificação do gabinete (contorno a cinzento) utilizado como caso de estudo.

As soluções de envidraçados analisadas no presente estudo encontram-se representadas na Figura 3. Os envidraçados estáticos são formados por dois panos de vidro incolor, sem e com uma película de controlo solar refletora, separados por uma câmara de ar (6+12+4 mm). O envidraçado dinâmico, correspondente ao envidraçado termocrómico, é constituído por um vidro TC laminado e um vidro de baixa emissividade, separados por uma câmara de ar (12+12+6 mm). O envidraçado TC apresenta um comportamento dinâmico entre 5°C (estado transparente) e 95°C (estado escurecido).

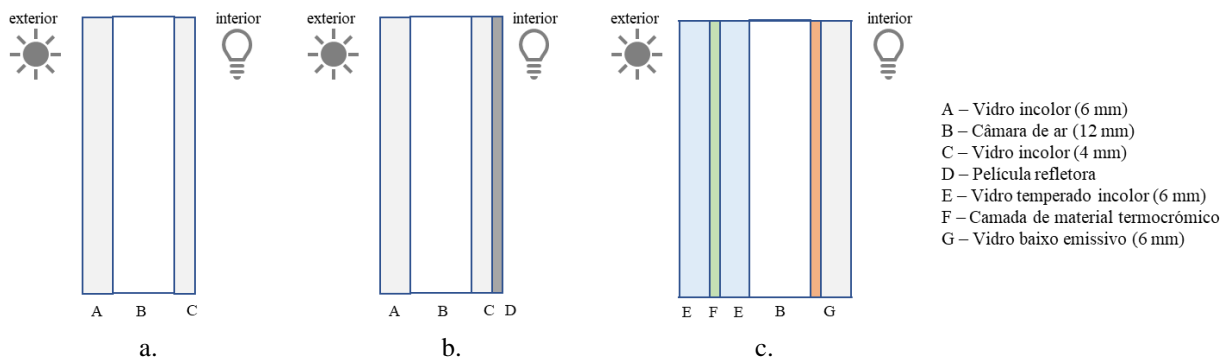


Figura 3: Configuração dos envidraçados analisados no presente estudo: a. Envidraçado incolor; b. Envidraçado incolor com película refletora; c. Envidraçado termocrómico.

Os valores das principais propriedades térmicas e óticas das soluções de envidraçados analisadas no presente estudo mostram-se na Tabela 1. O envidraçado termocrómico apresenta valores do coeficiente de transmissão térmica, do fator solar e da transmitância solar inferiores aos dos

envidraçados incolores com e sem proteção solar, sendo, por isso, expectável uma redução dos ganhos solares excessivos. No entanto, esta redução pode traduzir-se numa penalização do conforto térmico durante os meses mais frios, em que os ganhos solares são benéficos na atenuação das necessidades de climatização para aquecimento. Contrariamente ao envidraçado incolor com película, que pode penalizar a iluminação natural do gabinete devido à sua transmitância visível reduzida, o envidraçado termocrómico apresenta um intervalo de valores desta propriedade (1% a 49%), tornando-se assim mais versátil. Refira-se ainda que o envidraçado incolor com película de controlo solar e o envidraçado TC bloqueiam 99% da radiação ultravioleta, beneficiando a saúde dos ocupantes e a durabilidade dos materiais no gabinete.

Tabela 1: Principais propriedades térmicas e óticas dos envidraçados analisados no presente estudo obtidas a partir do Optics [15] e do Window [16]: coeficiente de transmissão térmica, U; fator solar, g; transmitância solar, τ_{sol} ; transmitância visível, τ_{vis} ; transmitância ultravioleta, τ_{UV} .

Envidraçado	Estado	Temperatura de transição [°C]	U [W/(m ² .K)]	g [-]	τ_{sol} [%]	τ_{vis} [%]	τ_{UV} [%]
Incolor			2.7	0.75	70	81	51
Incolor com película refletora			2.6	0.39	17	27	1
Termocrómico			1.6				1
	Transparente	5		0.32	19	49	
	Intermédio 1	15		0.31	18	47	
	Intermédio 2	25		0.29	17	43	
	Intermédio 3	45		0.21	10	23	
	Intermédio 4	65		0.13	3	6	
	Intermédio 5	85		0.10	1	1	
	Escurecido	95		0.10	1	1	

Simulação energética. Para aferir o desempenho energético de diferentes soluções de envidraçados, foi desenvolvido um modelo de simulação do gabinete do caso de estudo, calibrado com dados experimentais [17], recorrendo aos programas SketchUp, OpenStudio e EnergyPlus. Todas as superfícies do gabinete foram consideradas adiabáticas com exceção da parede exterior ($U = 2.6 \text{ W/m}^2.\text{K}$) e da cobertura ($U = 0.77 \text{ W/m}^2.\text{K}$). Os estores venezianos não foram considerados na simulação para se isolar o impacto das soluções de envidraçados do impacto do sistema de sombreamento no desempenho energético. O controlo da iluminação artificial na simulação foi realizado através da opção “continuous off”, que permitiu obter as necessidades de iluminação para alcançar as condições de conforto (500 lx na secretária). O sistema de ar condicionado foi considerado como estando em funcionamento durante o horário laboral com um intervalo de temperatura de conforto entre 20 °C e 24 °C. As seguintes variáveis foram selecionadas como output da simulação: estados do envidraçado termocrómico; necessidades energéticas para aquecimento e arrefecimento; consumo energético de iluminação artificial.

Considerou-se o ficheiro climático de três cidades europeias (Lisboa, Londres e Berlim) com o objetivo de melhor se compreender a influência do clima no comportamento dinâmico do envidraçado termocrómico. As três cidades selecionadas são representativas dos principais climas na Europa (Lisboa – clima temperado com verão quente e seco; Londres – clima temperado oceânico; Berlim – clima continental de verão fresco). A temperatura mensal média exterior e a radiação solar mensal acumulada numa superfície vertical orientada a sul das diferentes cidades mostram-se na Figura 4.

A Figura 5 apresenta a simulação anual da transmitância visível, em %, representativa do comportamento dinâmico do envidraçado TC para os três tipos de clima. No período da manhã o envidraçado fica mais escurecido devido ao aumento da temperatura causado pela radiação solar incidente, nunca atingindo o estado totalmente escurecido. Durante o horário laboral, o envidraçado encontra-se normalmente nos estados intermédios de escurecimento 1 a 3. O envidraçado termocrómico encontra-se no estado intermédio 3, correspondente a uma temperatura do material termocrómico entre 25°C e 45°C, durante 46% das horas laborais simulando a sua instalação sob o clima quente da cidade de Lisboa. Em contrapartida, o envidraçado dinâmico encontra-se no seu estado transparente durante 24% das horas laborais quando simulado sob o clima da cidade de Berlim.

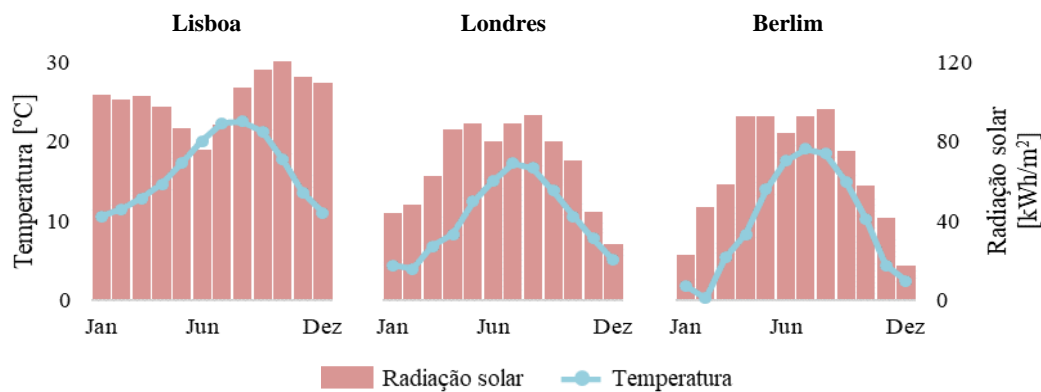


Figura 4: Temperatura mensal média exterior, em °C, e radiação solar mensal acumulada numa superfície vertical orientada a sul, em kWh/m², das diferentes cidades.

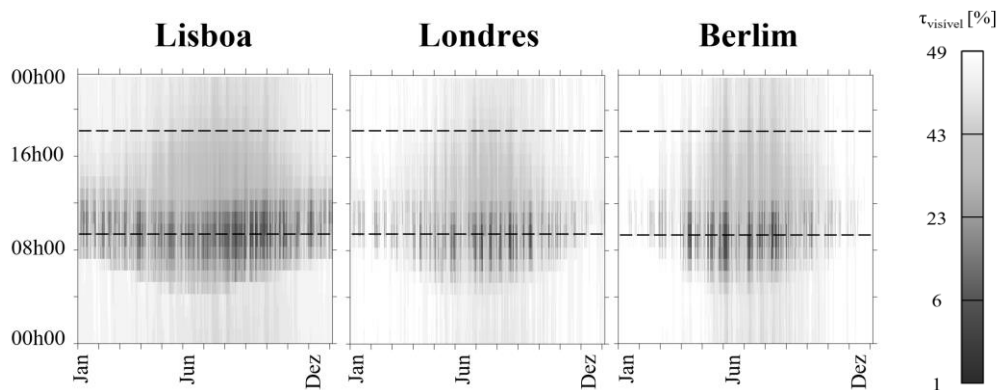


Figura 5: Comportamento dinâmico do envidraçado termocrómico no modelo de simulação ao longo do ano para os diferentes climas (linhas a tracejado – delimitação do horário laboral).

Desempenho energético do envidraçado termocrómico

As necessidades energéticas mensais para aquecimento e arrefecimento do gabinete foram estimadas pelo modelo de simulação considerando um sistema de ar condicionado ideal.

A Figura 6a apresenta as necessidades energéticas mensais para aquecimento e arrefecimento do gabinete, em kWh/m² de pavimento, na presença dos vários envidraçados e considerando os diferentes climas. Para cada clima, as necessidades energéticas para aquecimento são inferiores na presença do envidraçado incolor sem película devido ao seu fator solar elevado. Para o clima da cidade de Lisboa, todos os envidraçados são responsáveis por ganhos solares excessivos, que se traduzem em necessidades energéticas para arrefecimento elevadas e necessidades para aquecimento nulas. Apesar do envidraçado dinâmico ter permitido reduzir de modo geral as necessidades energéticas ao longo do ano, considerando os diferentes climas, a sua transmitância solar e fator solar reduzidos originaram um ligeiro aumento das necessidades para aquecimento nos meses mais frios. No entanto, este aumento é mais notório na presença do envidraçado com película refletora. As necessidades energéticas para climatização durante os meses de janeiro, fevereiro e dezembro são nulas considerando a instalação do envidraçado TC no clima de Lisboa.

A Figura 6b apresenta as necessidades energéticas anuais, em kWh/m² de pavimento, para os vários envidraçados considerando os diferentes climas. Apesar de originarem um aumento das necessidades para aquecimento, já referido anteriormente, os envidraçados com proteção solar permitiram reduzir as necessidades para arrefecimento em todos os climas, particularmente o envidraçado TC. Uma redução significativa das necessidades energéticas anuais para arrefecimento foi obtida com o envidraçado termocrómico em todos os climas (Lisboa – 64%; Londres – 70%, Berlim – 66%).

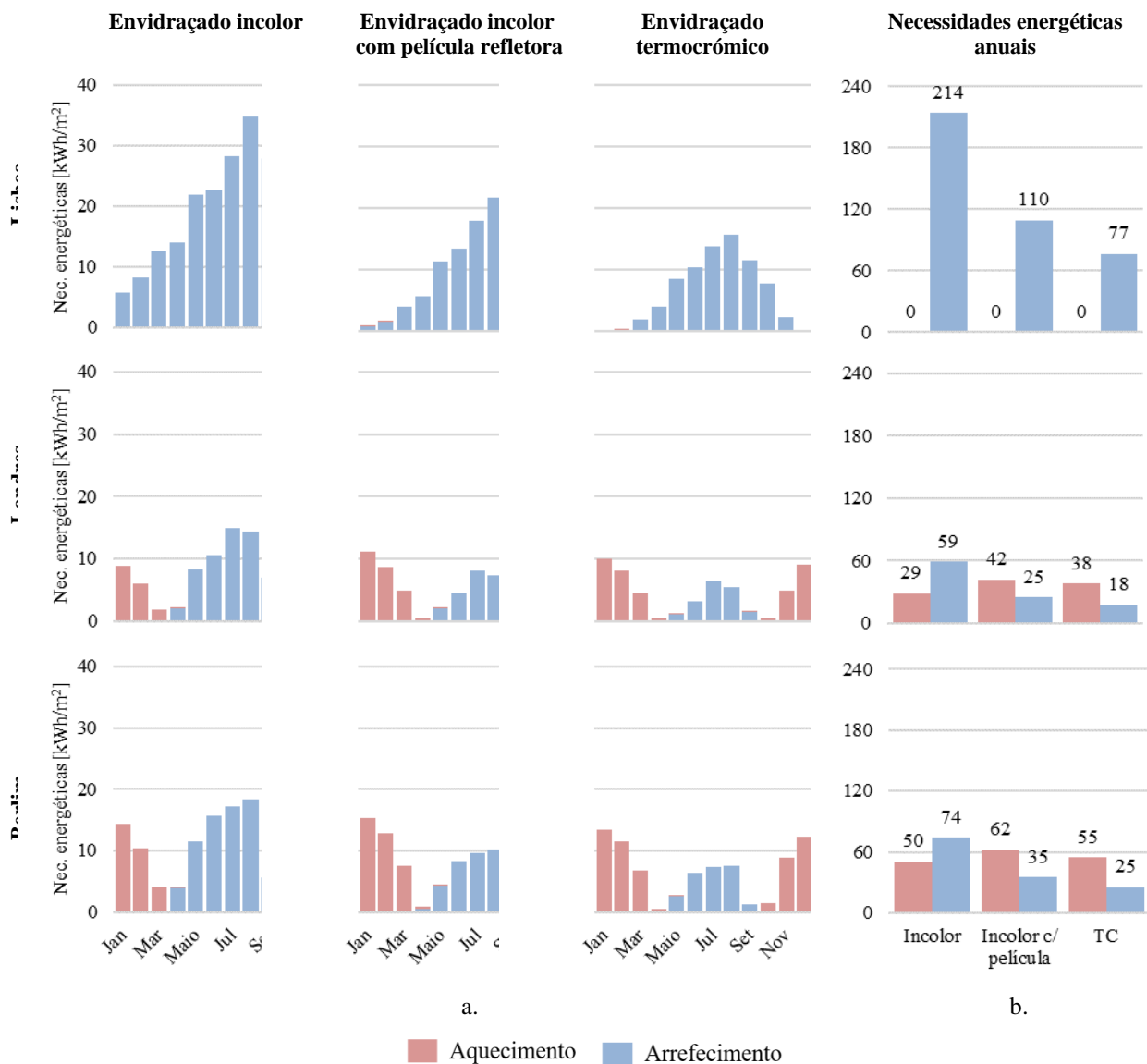


Figura 6: Necessidades energéticas mensais (a.) e anuais (b.) para aquecimento e arrefecimento, em kWh/m² de pavimento, para cada envidraçado sob os diferentes climas.

O consumo energético para climatização foi estimado a partir das necessidades energéticas apresentadas anteriormente e da eficiência do sistema de ar condicionado do gabinete. O consumo energético para iluminação artificial foi estimado pelo modelo de simulação considerando um ponto de referência no centro da secretária e um valor mínimo de iluminância durante o horário laboral de 500 lx.

A Figura 7a apresenta o consumo energético mensal para aquecimento, arrefecimento e iluminação artificial do gabinete, em kWh/m² de pavimento, estimado na presença dos vários envidraçados e sob os diferentes climas. O comportamento dinâmico do envidraçado TC permitiu reduzir o consumo energético para arrefecimento ao longo do ano, nos vários climas. Devido à sua elevada transmitância, o envidraçado incolor possibilitou a iluminação do gabinete, nos diferentes climas, sem ser necessário recorrer-se à iluminação artificial nos meses com níveis de radiação mais elevados (abril a agosto). Por outro lado, os envidraçados com proteção solar originaram um aumento do consumo de iluminação artificial, maioritariamente nos meses com níveis de radiação mais elevados.

A Figura 7a apresenta o consumo energético anual, em kWh/m² de pavimento, estimado para os vários envidraçados considerando os diferentes climas. Para os vários climas, o consumo energético anual para iluminação artificial é inferior ao consumo energético para climatização na presença de qualquer um dos envidraçados. Apesar da radiação incidente variar entre climas, o consumo energético anual de iluminação artificial é semelhante para um determinado envidraçado sob os

diferentes climas. O envidraçado dinâmico originou uma redução do consumo energético total (climatização e iluminação) de 50%, 13% e 6% quando simulado sob os climas de Lisboa, Berlim e Londres, respetivamente.

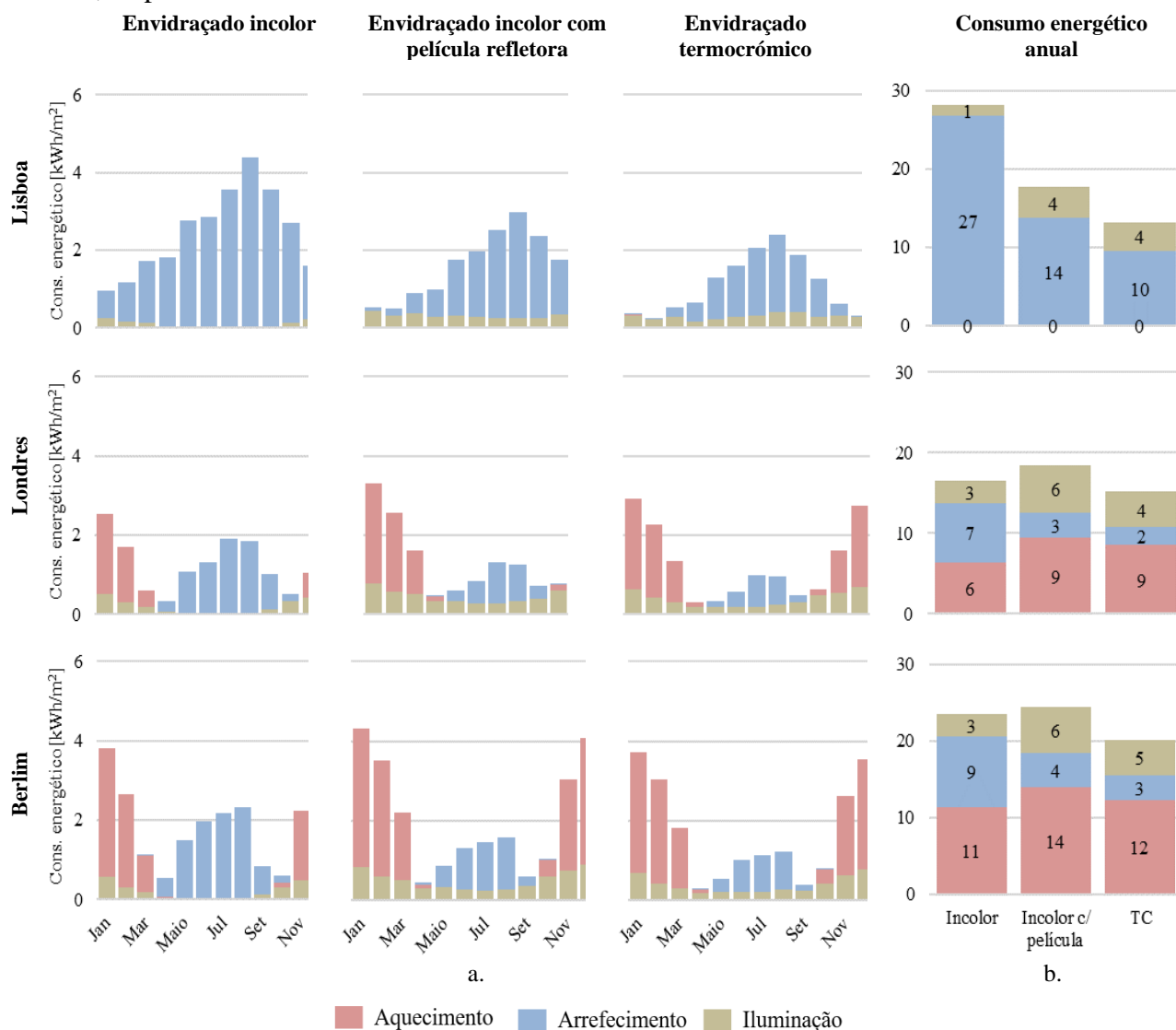


Figura 7: Consumo energético mensal (a.) e anual (b.) para climatização e iluminação artificial, em kWh/m² de pavimento, para cada envidraçado sob os diferentes climas.

Conclusões

Os resultados da simulação dinâmica do desempenho energético do envidraçado termocrómico instalado num gabinete sob os principais climas da Europa, permitiram retirar as seguintes conclusões:

- o envidraçado TC apresentou um maior escurecimento no período da manhã devido à elevada radiação solar incidente na fachada, mas nunca atingindo o estado totalmente escurecido;
- o envidraçado TC apresentou um melhor desempenho energético do que os envidraçados incolor com e sem proteção solar, considerando os diferentes climas;
- o comportamento dinâmico do envidraçado TC permitiu reduzir as necessidades energéticas de arrefecimento, mas originou um aumento das necessidades energéticas de aquecimento e do consumo energético de iluminação natural;
- o envidraçado TC permitiu uma redução do consumo energético anual (climatização e iluminação artificial) de 50%, 13% e 6% quando instalado sob o clima das cidades de Lisboa, Berlim e Londres, respetivamente, demonstrando que, apesar de ser mais eficiente em climas quentes, também apresenta um desempenho positivo em climas mais frios.

Agradecimentos

Os autores desejam expressar o seu agradecimento à unidade de investigação CERIS do IST-ID, Associação do Instituto Superior Técnico para a Investigação e Desenvolvimento e à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo financiamento da unidade de investigação CERIS (UIDB/04625/2020). Os autores desejam estender o seu agradecimento à empresa IMPERSOL e à European Window Film Association pelo apoio técnico. O primeiro autor deseja expressar o seu agradecimento à FCT pelo financiamento da sua bolsa de doutoramento (PD/BD/150576/2020).

Referências

- [1] R. Romano, L. Aelenei, D. Aelenei, and E. S. Mazzucchelli, *What is an adaptive façade? Analysis of recent terms and definitions from an international perspective*, Journal of Facade Design and Engineering, 6, no. 3 (2018) 065–076, doi: 10.7480/jfde.2018.3.2478.
- [2] M. Boubekri and N. Boubekri, *A Review of the Current State-of-the-Art Smart Glazing and Building Skin Materials Designed to Enhance Daylighting Design and Reduce Energy Consumption in Office Buildings*, The Journal of Macro Trends in Energy and Sustainability, 4, no. 1 (2016) 47–58.
- [3] H. Teixeira, M. G. Gomes, A. Moret Rodrigues, and J. Pereira, *Thermal and visual comfort, energy use and environmental performance of glazing systems with solar control films*, Build Environ, 168 (2020) 106474, doi: 10.1016/J.BUILDENV.2019.106474.
- [4] J. Pereira, M. G. Gomes, A. M. Rodrigues, and M. Almeida, *Thermal, luminous and energy performance of solar control films in single-glazed windows: Use of energy performance criteria to support decision making*, Energy Build, 198 (2019) 431–443, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.06.003.
- [5] R. Baetens, B. P. Jelle, and A. Gustavsen, *Properties, requirements and possibilities of smart windows for dynamic daylight and solar energy control in buildings: A state-of-the-art review*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 94, no. 2 (2010) 87–105, doi: 10.1016/j.solmat.2009.08.021.
- [6] M. Aburas, V. Soebarto, T. Williamson, R. Liang, H. Ebendorff-Heidepriem, and Y. Wu, *Thermochromic smart window technologies for building application: A review*, Appl Energy, 255 (2019) 113522, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113522.
- [7] R. Tällberg, B. P. Jelle, R. Loonen, T. Gao, and M. Hamdy, *Comparison of the energy saving potential of adaptive and controllable smart windows: A state-of-the-art review and simulation studies of thermochromic, photochromic and electrochromic technologies*, Solar Energy Materials and Solar Cells, (2019), doi: 10.1016/j.solmat.2019.02.041.
- [8] S. Hoffmann, E. S. Lee, and C. Clavero, *Examination of the technical potential of near-infrared switching thermochromic windows for commercial building applications*, Solar Energy Materials and Solar Cells, 123 (2014) 65–80, doi: 10.1016/j.solmat.2013.12.017.
- [9] G. E. Arnaoutakis and D. A. Katsaprakakis, *Energy Performance of Buildings with Thermochromic Windows in Mediterranean Climates*, Energies (Basel), (2021), doi: 10.3390/en14216977.
- [10] V. Costanzo, G. Evola, and L. Marletta, *Thermal and visual performance of real and theoretical thermochromic glazing solutions for office buildings*, Solar Energy Materials and Solar Cells, (2016), doi: 10.1016/j.solmat.2016.01.008.

- [11] R. Liang, Y. Sun, M. Aburas, R. Wilson, and Y. Wu, *Evaluation of the thermal and optical performance of thermochromic windows for office buildings in China*, *Energy Build*, (2018), doi: 10.1016/j.enbuild.2018.07.009.
- [12] M. Arnesano *et al.*, *Optimization of the thermochromic glazing design for curtain wall buildings based on experimental measurements and dynamic simulation*, *Solar Energy*, (2021), doi: 10.1016/j.solener.2021.01.013.
- [13] F. Favoino, L. Giovannini, A. Pellegrino, and V. Serra, Building performance of thermochromic glazing, in *Eco-efficient Materials for Reducing Cooling Needs in Buildings and Construction*, Elsevier Ltd., (2021) 401–437, doi: 10.1016/b978-0-12-820791-8.00017-1.
- [14] E. S. Lee, X. Pang, S. Hoffmann, H. Goudey, and A. Thanachareonkit, *An empirical study of a full-scale polymer thermochromic window and its implications on material science development objectives*, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 116 (2013) 14–26, doi: 10.1016/j.solmat.2013.03.043.
- [15] Optics | Windows and Daylighting, <https://windows.lbl.gov/software/optics>, em 24/02/2020.
- [16] C. Curcija, S. Vidanovic, R. Hart, J. Jonsson, and R. Mitchell, WINDOW Technical Documentation. Lawrence Berkeley Natl. Lab., (2018).
- [17] H. Teixeira, M. da Glória Gomes, A. Moret Rodrigues, and J. Pereira, *In-Service Thermal and Luminous Performance Monitoring of a Refurbished Building with Solar Control Films on the Glazing System*, *Energies (Basel)*, 14, no. 5 (2021) 1388, doi: doi.org/10.3390/en14051388.

Evolução do método ARICA:2019 - ARICA:2022

COELHO António Leça^{1,a} e CORDEIRO Elisabete da Cunha^{2,b}

¹Universidade Lusófona do Porto, Portugal

²Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

^ap901967@ulp.pt, ^becordeiro@lnec.pt

Palavras-chave: Edifícios, Reabilitação, Segurança, Incêndio, método de avaliação.

Resumo. O método de avaliação das condições de segurança ao incêndio ARICA:2022, representa uma evolução do ARICA:2019 [1] e permite aos técnicos de segurança ao incêndio em edifícios (SIE) definir e fundamentar as soluções de projeto para os edifícios existentes, podendo assim dispensar o cumprimento de algumas disposições da legislação em vigor. O método originalmente desenvolvido no LNEC e publicado em 2019, concretiza o previsto no n.º 3 do art.º 14.º-A do Decreto-Lei 220/2008, de 12 de novembro [2], na redação conferida pelo Decreto-Lei n.º 95/2019 [3] e permite determinar um índice que quantifica a SIE de um determinado edifício. Procurando corporizar os princípios expressos no Decreto-Lei n.º 95/2019 [3], o método permite encontrar soluções que visam conciliar a melhoria das condições de habitabilidade com uma resposta responsável e proporcionada em termos de respeito pela preexistência e pela sustentabilidade ambiental (artigos 4.º, 5.º e 6.º). As alterações introduzidas no ARICA:2022 estendem-se à generalidade dos fatores que constituem o método e permitem reforçar, ainda mais, os objetivos expressos no Decreto-Lei n.º 95/2019 e introduzir um maior rigor no resultado final. Esta comunicação tem como objetivo fundamental apresentar uma síntese das alterações que foram introduzidas nesta nova versão e as justificações que as ditaram.

Introdução

O método ARICA:2019 [2] surge como um dos resultados do projeto “Reabilitar como Regra”, adiante designado pelo acrónimo “RcR”, criado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 170/2017, publicada em Diário da República, 1.ª série — N.º 216, em 9 de novembro de 2017.

O objetivo principal do RcR consistia na “revisão do enquadramento legal e regulamentar da construção, de modo a adequá-lo às exigências e especificidades da reabilitação”, conciliando as “legítimas expectativas em termos de adequação aos atuais padrões de segurança, habitabilidade, conforto e de simplificação do processo de reabilitação, com os princípios da sustentabilidade ambiental e da proteção do património edificado, em sentido lato”.

No domínio da segurança ao incêndio em edifícios o resultado foi, a curto prazo, a clarificação e densificação do artigo 14.º-A do DL 224/2015 [4], dedicado aos “Edifícios e recintos existentes”, uma vez que o relatório de diagnóstico conclui pela sua total ineficácia.

Neste domínio existem as dificuldades inerentes a um regulamento com carácter prescritivo e, portanto, adverso à avaliação da eficácia de um conjunto de medidas parcial.

A regulamentação de segurança contra incêndios em edifícios não está abrangida pelo RERE, mas há notícia de que é frequentemente ultrapassada pelo recurso ao princípio da proteção do existente, com aplicação muito diferenciada nos diferentes municípios e enfermando das mesmas limitações atrás indicadas, no que respeita à previsibilidade do desempenho final.

Assim, não obstante, a forte convicção de que a regulamentação deve tender para uma filosofia de análise do nível de segurança ao incêndio, que permita também dar resposta às especificidades da reabilitação, foi necessário encontrar uma solução temporária que, de facto, permitisse intervenções racionais e proporcionadas, com melhoria progressiva da segurança, em articulação com as alterações a introduzir no RGEU.

O Decreto-Lei n.º 95/2019, de 18 de julho [3], estabeleceu o regime aplicável à reabilitação de edifícios ou frações autónomas. Nele são definidos os princípios fundamentais que todas as operações de reabilitação devem cumprir, visando conciliar a melhoria das condições de habitabilidade com uma resposta responsável e proporcionada em termos de respeito pela preexistência e pela sustentabilidade ambiental.

No domínio da SIE, o Decreto Lei n.º 220/2008, de 12 de novembro, através da redação conferida pelo Decreto-Lei n.º 224/2015, de 9 de outubro, já previa a possibilidade de aplicar, às intervenções em edifícios existentes, métodos de verificação de segurança ao incêndio alternativos e não prescritivos.

Com a publicação do Decreto-Lei n.º 95/2019, clarificaram-se e densificaram-se as situações em que é possível recorrer à aplicação desses métodos. Para o efeito, foi alterado o artigo 14.º-A do Decreto Lei n.º 220/2008, ficando consagrado que:

- Pode ser dispensada a aplicação de algumas disposições da regulamentação de segurança ao incêndio quando a sua aplicação seja manifestamente desproporcionada, ao abrigo dos princípios previstos no Decreto-Lei n.º 95/2019, mediante decisão da entidade competente para a apreciação do projeto de segurança contra incêndio em edifícios;
- Cabe ao projetista determinar as medidas de segurança contra incêndio a implementar no edifício, com fundamentação adequada na memória descritiva do projeto de segurança contra incêndio, recorrendo a métodos de análise das condições de segurança contra incêndio ou métodos de análise de risco, reconhecidos pela ANEPC ou por método a publicar pelo LNEC.

Foi neste contexto que, em julho de 2019, se deu início ao desenvolvimento do referido método, tendo a versão ARICA:2019 sido publicada em setembro desse ano.

No presente artigo apresenta-se uma nova versão do método ARICA:2019, designado ARICA:2022. Esta nova versão, que será publicada mais de 2 anos após a primeira, é o resultado da experiência adquirida em diversas ações de formação que foram concretizadas durante este período de tempo e que permitiram testar de forma mais intensa a robustez do método e a necessidade de aperfeiçoamentos. Contou-se, ainda, com o contributo de diversos técnicos, uns que participaram diretamente nas ações de formação, outros que aplicaram o método na sua atividade de projeto.

As principais alterações introduzidas têm como objetivo fundamental conferir um maior rigor ao método, constituindo mais um passo, ainda que pequeno, no sentido de o fazer evoluir para uma outra versão em que se abandone o referencial que atualmente ainda depende muito da regulamentação de SIE em vigor, o que permitirá obter soluções mais fundamentadas.

Breve caracterização do método

O ARICA é um método que, quando aplicado a um edifício a reabilitar, ou parte dele, permite obter um indicador, designado de índice de segurança ao incêndio (ISI), obtido a partir da aplicação da equação (1).

$$I_{SI} = 0,1 \times FG_{II} + 0,35(FG_{DPI} + FG_{EE}) + 0,2 \times FG_{CI} . \quad (1)$$

em que:

- FG_{II} - Fator global relativo ao início do incêndio;
- FG_{EE} - Fator global relativo à evacuação em caso de incêndio;
- FG_{CI} - Fator global relativo ao combate ao incêndio.

Os fatores globais indicados pretendem representar os principais acontecimentos no decurso de um incêndio: início, desenvolvimento e propagação, evacuação e combate. Esses fatores globais são constituídos, por fatores parciais, os quais ainda são constituídos por fatores elementares.

Consoante o valor do I_{SI} é superior, igual ou inferior a 1, o seu significado é o seguinte:

- $I_{SI} > 1,00$ – Nível de segurança superior ao mínimo exigido pelo método;
- $I_{SI} = 1,00$ – Nível de segurança idêntico ao exigido pelo método;
- $I_{SI} < 1,00$ – Nível de segurança inferior ao exigido pelo método.

Para aplicação do ARICA foi criado um conceito novo, o de unidade de análise (UA). A UA mais não é do que o conjunto de espaços que um ocupante situado num local de risco (LR) terá de atravessar para alcançar o exterior do edifício, podendo ser vias horizontais (VH) e vias verticais de evacuação (VE).

Assim, a forma de identificar uma UA consiste em nos posicionarmos num determinado local e verificar os espaços que têm de ser percorridos até atingir o exterior do edifício ou uma zona considerada segura.

Na Figura 1 esquematiza-se a constituição de uma UA situada num piso acima do plano de referência, podendo observar-se, de acordo com as designações anteriormente estabelecidas, os vários espaços que são percorridos pelo ocupante até sair para o exterior.

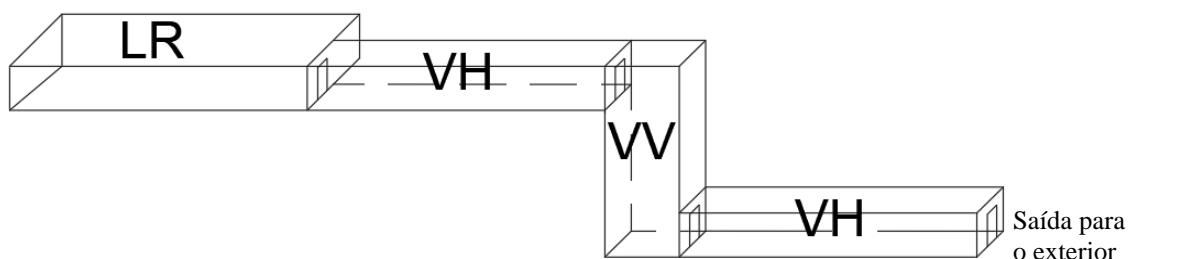


Figura 1: Representação esquemática da constituição de uma unidade de análise

Num edifício a reabilitar, o ARICA aplica-se às diversas UA que podem ser identificadas, esquematizando-se na Figura 2 a seleção das UA.

A cada uma UA corresponde um $I_{SI,i}$ (I_{SI} ao incêndio da UA de ordem i), obtido a partir da equação (2).

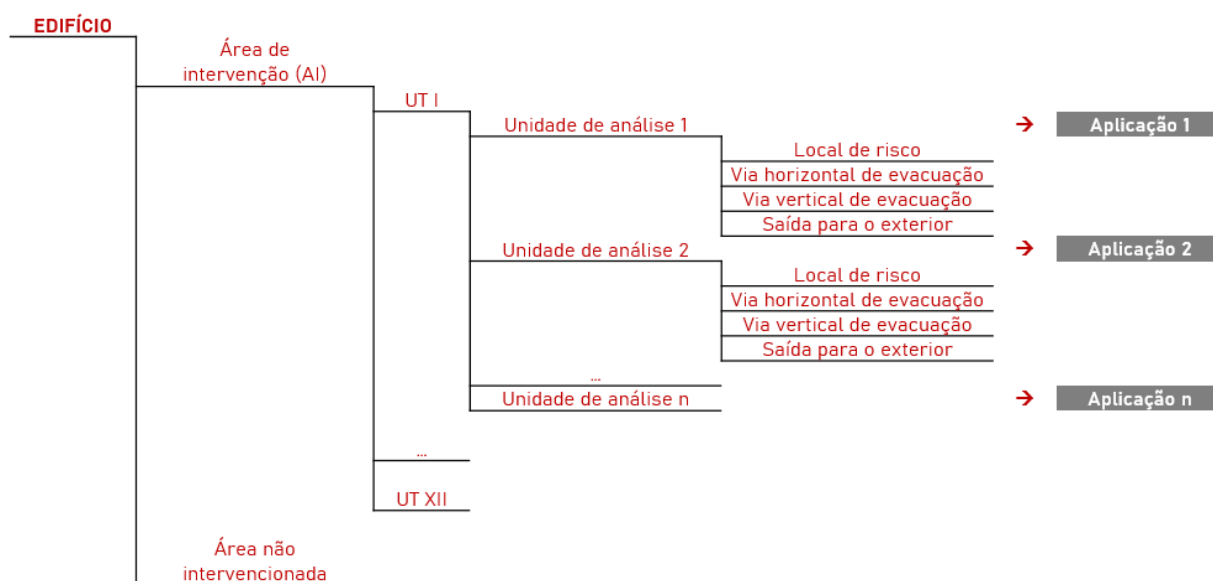


Figura 2: Representação esquemática de aplicação do método

Se na AI existir mais do que uma UA, o I_{SI} é calculado pela equação (2).

$$I_{SI} = \text{mínimo} (I_{SI,i}). \quad (2)$$

São admissíveis, em algumas circunstâncias, valores do I_{SI} inferiores a 1,00, de acordo com as condições expressas no próprio método, as quais dependem da profundidade da intervenção a que o edifício em causa, ou parte dele, vai ser sujeito.

De acordo com a profundidade das alterações previstas para a AI, as intervenções são classificadas em Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3 ou Tipo 4, sendo essa profundidade quantificada em função da alteração que ocorra relativamente ao seguinte conjunto de fatores:

- Utilização-tipo (UT);
- Categoria de risco;
- Locais de risco;
- Número e largura das saídas dos locais de risco;
- Efetivo dos locais de risco;
- Vias de evacuação;
- Demolição integral do edifício mantendo a(s) fachada(s).

O grau da profundidade da intervenção cresce de 1 até 4. Nos casos em que se está na presença na presença de intervenções menos profundas (Tipo 1 e Tipo 2), o I_{SI} pode ser inferior a 1 e o seu valor depende das condições iniciais de segurança ao incêndio, ainda antes da intervenção, sendo obtido a partir das respetivas equações previstas no ARICA. Nestes casos, o projetista terá de aplicar o método para as condições iniciais, isto é, ainda antes do edifício sofrer a intervenção prevista e para as condições de projeto que correspondem às que serão implementadas no decurso da reabilitação.

No caso da intervenção Tipo 3, o valor do I_{SI} das condições de projeto terá de ser, no mínimo, igual a 1, pelo que neste caso o projetista não necessita de aplicar o método às condições iniciais, pois elas não influenciam o valor do I_{SI} .

Finalmente, a intervenção Tipo 4, corresponde às situações em que por motivos diversos o projetista não consegue respeitar determinados critérios mínimos previstos no método. Cita-se, a título de exemplo, as dimensões das vias de evacuação em que o método estabelece que a sua largura mínima não pode ser inferior a 0,70 m. Se por qualquer motivo o projetista não consegue que após a reabilitação todas as vias tenham uma largura no mínimo igual a esta, ele pode aplicar o método, mas a intervenção passa a ser obrigatoriamente do Tipo 4 e ele terá de justificar a s razões porque é impossível respeitar o referido critério. Nesta intervenção o método não fixa um valor mínimo para o I_{SI} que, no entanto, terá de ser sempre superior ao correspondente às condições iniciais.

Na Tabela 1 sintetizam-se as condições relativas a cada uma das várias utilizações-tipo.

Tabela 1: Condições de aplicação do ARICA para cada uma das intervenções-tipo

Intervenção-tipo	Condições iniciais	Condições de projeto
Intervenção-tipo 1	Obrigatório se $I_{SI,CP} < 1,00$	Obrigatório
Intervenção-tipo 2	Obrigatório se $I_{SI,CP} < 1,00$	Obrigatório
Intervenção-tipo 3	Não obrigatório	Obrigatório
Intervenção-tipo 4	Não obrigatório	Obrigatório

Síntese das principais alterações introduzidas na versão ARICA:2022

Aspetos gerais. A versão inicial do método, designada ARICA: 2019, apresenta do ponto de vista conceptual diversos aspetos que foram sendo identificados como havendo necessidade de introduzir melhores, mesmo antes de se ter uma versão final, relativamente à qual se possa dizer que está consolidada.

Assim, a versão ARICA:2022, que será publicada no 4.º trimestre deste ano, representa essa evolução intermédia, estando as principais alterações relacionadas com as seguintes matérias:

- Âmbito de aplicação;
- Referencial
- O impacto de diversos meios em mais do que um
- Equação geral relativa ao índice de segurança ao incêndio (ISI);
- Intervenções-Tipo;
- Fator global de início de incêndio;
- Fator global desenvolvimento e propagação do incêndio;
- Fator global evacuação do edifício;
- Fator global combate ao incêndio.

Nas secções seguintes é apresentada, sumariamente, uma descrição dessas alterações e dos motivos que as justificaram.

Alteração do âmbito de aplicação. O âmbito de aplicação do ARICA:2019 corresponde ao estabelecido nos artigos 3.º e 14.º-A do Decreto-Lei n.º 220/2008, com a exclusão das três situações seguintes:

- Edifícios em que existam locais de risco com um efetivo superior a 199 pessoas.
- Edifícios em que existam vias de evacuação cujo efetivo, para efeito da determinação da sua largura, seja superior a 500 pessoas no caso das horizontais e 1000 pessoas nas verticais.
- Reconstrução precedida de demolição integral do edifício pré-existente, mesmo quando se mantenham as paredes exteriores.

No ARICA:2022, eliminaram-se as duas primeiras condições, pelo que a nova versão do método só não se aplica a situações de reabilitação precedida de demolição integral do edifício pré-existente, mesmo quando se mantenham as paredes exteriores.

Referencial. O método ARICA:2019 estabelece uma comparação entre as medidas de SIE exigidas na regulamentação [2], [4], [5], [6] e [7], com as que existem no edifício antes da reabilitação (condições iniciais) ou com as que vão ser implementadas (condições de projeto).

Aquilo que serve de comparação, isto é, o referencial, está baseado, essencialmente, na atual regulamentação de SIE, com algumas exceções que são estabelecidas no próprio método. No ARICA:2022 aumentaram as situações em que o referencial deixou de ser a regulamentação para passar a ser definido no próprio método.

Alteração do impacto de meios de segurança comuns a vários fatores globais. Enquanto no ARICA:2019 não existia nenhum meio de segurança ao incêndio que integrasse todos os fatores globais, isso já não acontece no ARICA:2022, pois alguns deles são comuns aos vários fatores. Por outro lado, enquanto no ARICA:2019, um determinado meio de segurança comum a vários fatores globais, como por exemplo, as equipas de segurança, assumia o mesmo valor nesses fatores, o que já não acontece no ARICA:2022. Assim, por exemplo, a organização e gestão da segurança, que é comum a todos os fatores globais, toma valores diferentes consoante o fator em causa, pois o seu impacto é variável nos aspetos de segurança que esses fatores representam.

Alteração da equação relativa ao Índice de Segurança ao Incêndio (ISI). O índice de segurança ao incêndio (ISI), tal como foi definido na versão de 2019, não refletia a importância que cada um dos 4 fatores globais que são a estrutura nuclear do método.

No ARICA:2019, todos os fatores globais tinham o mesmo peso na equação geral do ISI o que de facto não reflete o real impacto que as medidas de SIE associadas a cada um desses fatores tem no edifício.

Assim, o ISI relativo a cada uma das unidades de análise (UA) é obtido a partir da equação (3).

$$I_{SI,i} = 0,1 \times FG_{II,i} + 0,35(FG_{DPI,i} + FG_{EE,i}) + 0,2 \times FG_{CI,i}. \quad (3)$$

em que:

- $FG_{II,i}$ - Fator global relativo ao início do incêndio na UA de ordem i ;
- $FG_{DPI,i}$ - Fator global relativo ao desenvolvimento e propagação do incêndio da UA de ordem i ;
- $FG_{EE,i}$ - Fator global relativo à evacuação em caso de incêndio da UA de ordem i ;
- $FG_{CI,i}$ - Fator global relativo ao combate ao incêndio da UA de ordem i .

A nova equação geral relativa ao ISI reflete de forma mais aproximada o impacto que os meios de segurança afetos a cada um dos fatores globais tem na segurança do edifício.

Alterações ao fator global início do incêndio (FGII). O FG_{II} foi alterado com vista a considerar dois novos fatores parciais que pretendem representar o impacto que a eventual existência de um serviço de organização e gestão da segurança ao incêndio (FP_{OGSI}) pode ter no eclodir de um incêndio e a possibilidade de este ocorrer devido à radiação emitida por um outro que está na sua proximidade (FP_R).

No caso da organização e gestão de segurança, é natural que a sua existência possa a diminuir a possibilidade de ocorrência do incêndio, pois os procedimentos previstos contribuem para reduzir as causas que estão na origem dos incêndios.

Quanto à possibilidade de um incêndio num edifício se propagar a um outro, que está na sua proximidade, ela aumentará com a diminuição do afastamento entre eles.

Alterações ao fator global de desenvolvimento e propagação do incêndio (FGPI). Embora na designação do fator apareça o termo desenvolvimento, o FG_{DPI} avalia, essencialmente, a questão da limitação da propagação do incêndio, fazendo intervir três componentes: os meios passivos de proteção, os meios ativos de proteção e a organização e gestão da segurança.

O FG_{PI} sofreu diversas alterações, tendo-se reorganizando os fatores parciais que o constituem e, ainda, considerado um novo fator elementar relativo aos meios de extinção automática, que está integrado no fator parcial relativo aos meios ativos.

Assim, o FG_{DPI} passa a ser obtido a partir da equação (4) a seguir indicada.

$$FG_{DPI} = \frac{FP_{MPSI} + FP_{MASI} + FP_{OGSI}}{3} \quad (4)$$

em que:

- FP_{MPSI} – Fator parcial relativo aos meios passivos de segurança ao incêndio na UA;
- FP_{MASI} – Fator parcial relativo aos meios ativos na UA;
- FP_{OGS} – Fator parcial relativo à organização e gestão da SI se no edifício estiver implementada e incluir a área de intervenção.

Alterações ao fator global evacuação do edifício (FGEE). As alterações introduzidas no FGEE tiveram como objetivo corrigir aspetos relacionados com a quantificação do valor deste fator, que não refletiam com o rigor desejado o que se passa em matéria de evacuação.

Num processo de evacuação de um edifício pode-se considerar as seguintes fases distintas:

- Fase 1: Deteção e alerta:
 - Esta fase ocorre antes do processo de evacuação e desenvolve-se a partir do momento em que deflagrou o incêndio, até ao instante em que pelo menos um dos ocupantes teve conhecimento desse facto.
- Fase 2: Reação:
 - Fase que se inicia a partir do momento em que pelo menos um ocupante tem conhecimento da existência do incêndio, e cujo fim ocorre quando todos os ocupantes desenvolvem ações com vista a deixar o edifício. Nesta fase, podem existir pessoas que ainda não tiveram conhecimento do incêndio, outras que conhecendo o incêndio não decidiram ainda deixar o edifício e, finalmente, as restantes que já iniciaram o processo de saída para o exterior.
- Fase 3: Evacuação:
 - Nesta fase, as ações de todos os ocupantes que ainda estão no interior do edifício têm como objetivo a saída para o exterior.

É um dado adquirido que algumas das pessoas envolvidas numa situação de emergência realizam ações diversas antes de decidirem deixar o edifício, pelo que o tempo total que elas demoram a alcançar o exterior (T_E), considerando como origem dos tempos o instante em que se dá a deflagração do incêndio, pode ser obtido a partir da equação (5) a seguir indicada:

$$T_E = T_a + T_r + T_p \quad (5)$$

em que:

- T_a - Tempo que decorre entre o momento em que tem início o incêndio e o instante em que o ocupante tem conhecimento desse facto (Tempo de alerta).
- T_r - Tempo "gasto" pelo ocupante em ações que não têm como objetivo a evacuação do edifício e que está compreendido entre o momento em que o ocupante toma conhecimento do incêndio e a altura em que decide deixar o edifício (Tempo de reação).

- T_p - Tempo que o ocupante demora a fazer o percurso até ao exterior (Tempo de Percurso), com início no momento em que decide deixar o edifício e término quando alcança o seu exterior ou um lugar considerado como seguro.

No ARICA somente se avalia o T_p , sendo ignorado o aspeto comportamental dos ocupantes, enquanto o T_a é considerado de forma indireta, ao ser incorporado num fator parcial que representa os meios de proteção dos caminhos de evacuação (FP_{PCE}).

O tempo de trajeto T_p pode considerar-se que ele tem duas componentes distintas: uma que depende da largura dos caminhos de evacuação, isto é, do fluxo que esses caminhos permitem e a outra relacionada com a distância que os ocupantes têm de percorrer, sabendo-se, no geral, que o peso destas duas componentes não é igual, pois o que é condicionante é a questão de atravessamento de secções.

Tendo presente os aspetos referidos, o FG_{EE} passou a ser determinado pela equação (6) a seguir indicada.

$$FG_{EE} = \frac{FP_{DCE} + FP_{PCE}}{2} . \quad (6)$$

em que:

- FP_{DCE} – Fator parcial relativo às dimensões dos caminhos de evacuação;
- FP_{PCE} – Fator parcial relativo à proteção dos caminhos de evacuação.

Assim, o FP_{DCE} ele é obtido a partir da equação (7) a seguir indicada.

$$FG_{DCE} = 0,7 \times FE_{LCE} + 0,3 \times FE_{DCE} . \quad (7)$$

em que:

- FE_{LCE} – Fator elementar relativo à largura dos caminhos de evacuação
- FE_{DCE} – Fator elementar relativo às distâncias a percorrer nos caminhos de evacuação

Alterações introduzidas no fator global combate ao incêndio (FGCI). Relativamente ao FGCI as principais alterações introduzidas foram as seguintes:

- Eliminação do fator parcial relativo aos meios de extinção automáticos, passando a fazer parte do FGDPI.
- Reorganização dos fatores parciais que integram o FGCI, tendo presente que os meios que possibilitam a maior ou menor eficácia de combate ao incêndio podem ser exteriores ao edifício, ou pertencerem a este.

Foram, assim, considerados dois fatores parciais, um relativo aos meios exteriores ao edifício (FP_{ME}) e outro aos interiores (FP_{MI}).

Decorrente das alterações referidas o FG_{CI} passou a ser determinado pela equação (8) a seguir indicada.

$$FG_{CI} = \frac{FP_{ME} + FP_{MI}}{2} . \quad (8)$$

em que:

- FP_{ME} : Fator parcial relativo aos meios exteriores ao edifício, relacionados com o combate ao incêndio;
- FP_{MI} : Fator parcial relativo aos meios internos do edifício, relacionados com o combate ao incêndio.

O FP_{ME} é constituído por dois fatores elementares, um relativo às condições de acessibilidade das viaturas dos bombeiros ao edifício e o outro referente aos hidrantes exteriores.

Quanto ao FP_{MI} ele é constituído pelo fator elementar relativo às redes secas ou húmidas, pelo fator elementar relativo aos extintores e, finalmente, pelo fator elementar relativo às redes de incêndio armadas.

Conclusões e estudos futuros

Esta nova versão do ARICA é mais um passo, ainda que limitado, no sentido de fazer o método evoluir para uma outra versão, baseada essencialmente na engenharia de segurança ao incêndio, abandonando no essencial a legislação como referencial, e que permitirá obter soluções mais fundamentadas do que aqueles que resultam da aplicação no estado atual.

Nesta nova versão do método ARICA, que se considera como uma fase intermédia da evolução do método, foram feitos diversos ajustamentos ao ARICA:2019, procurando que ele quantifique, com maior rigor, a segurança ao incêndio de um edifício sujeito a uma operação de reabilitação.

As principais alterações introduzidas incidiram, essencialmente, sobre os seguintes aspetos:

- Âmbito de aplicação;
- Referencial;
- O impacto de diversos meios em mais do que um fator;
- Equação geral relativa ao índice de segurança ao incêndio;
- Quantificação de diversos fatores globais, parciais e elementares.

Considera-se que no futuro devem ser desenvolvidos estudos com vista à consolidação do ARICA, sobretudo no que se refere ao estabelecimento de um novo referencial, baseado na engenharia de segurança ao incêndio e na capacidade de desempenho dos meios de segurança implementados no edifício, em detrimento do atual, ainda muito baseado na regulamentação em vigor.

Referências

- [1] A. Leça Coelho, João Branco Pedro, Magda Vicente, Tiago Ferreira, *ARICA:2019. Método de avaliação da segurança ao incêndio em edifícios existentes. Descrição, âmbito e condições de aplicação*. LNEC, Relatório 327/2019 – DED/NUT (Versão revista, dezembro 2019).
- [2] Decreto-Lei n.º 220/2008 [Estabelece o Regime Jurídico da Segurança Contra Incêndios em Edifícios]. Diário da República, 1.ª Série. N.º 220 (2008-11-12) pp. 7903-7922.
- [3] Decreto-Lei n.º 95/2019 [Estabelece o regime aplicável à reabilitação de edifícios ou frações autónomas]. Diário da República, 1.ª Série. N.º 136 (2019-07-18) pp. 35-45.
- [4] Decreto-Lei n.º 224/2015 [Procede à primeira Alteração ao Regime jurídico de segurança contra incêndio em edifícios]. Decreto-Lei n.º 224/2015. Diário da República, 1.ª Série. N.º 198 (2015-10-9) pp. 8740-8774.
- [5] Portaria n.º 1532/2008 [Aprova o Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios]. Diário da República, 1.ª Série. N.º 250 (2008-12-29) pp. 9050-9127.
- [6] Lei n.º 123/2019 [Procede à terceira alteração ao Decreto-Lei n.º 220/2008, de 16 de dezembro, que estabelece o regime jurídico da segurança contra incêndios em edifícios]. Diário da República, 1.ª Série. N.º 201 (2019-10-18) pp. 3-53.
- [7] Portaria n.º 135/2020 [Procede à primeira alteração do Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios]. Diário da República, 1.ª Série. N.º 107 (2020-06-02) pp. 2-214.

Perfil tendencial de comportamento dos ocupantes em caso de incêndio

CORDEIRO Elisabete da Cunha^{1, a}, COELHO António Leça^{2, b} e
NEPOMUCENO Miguel C. S.^{3, c}

¹Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

²Universidade Lusófona do Porto, Portugal

³Universidade da Beira Interior, C-MADE, Lab2PT, Portugal

^aecordeiro@lnec.pt, ^bp901967@ulp.pt, ^cmcsn@ubi.pt

Palavras-chave: Comportamento Humano, Evacuação, Incêndio.

Resumo. A importância do comportamento humano em situações de evacuação é reconhecida por todos os que de algum modo estão relacionados com a segurança contra incêndios em edifícios, como é comprovado pelo elevado número de estudos e projetos de investigação que têm sido desenvolvidos. Nesta comunicação apresentam-se os resultados de um projeto de investigação, que deu origem a uma tese de doutoramento, cujo objetivo foi o de prever esse comportamento e analisar os fatores que mais fortemente o condicionam. Nesse trabalho, a informação que suporta as conclusões foi obtida a partir de 4 tipos de inquéritos destinados a pessoas distintas (pessoas que viveram uma situação de incêndio, pessoas que participaram em exercícios de evacuação, pessoas no geral e bombeiros que estiveram envolvidos nas operações de combate e salvamento). No total obtiveram-se mais de mil inquéritos convenientemente preenchidos, a partir dos quais, e após uma análise e tratamento estatístico, foi criado um perfil tendencial de comportamento dos ocupantes em caso de incêndio. Com recurso a um modelo de simulação de evacuação foi avaliado o impacto desse perfil no tempo total de evacuação em diferentes edifícios que foram desenhados especificamente para o estudo. Nesta comunicação apresentam-se os resultados fundamentais desse estudo, incluindo as conclusões sobre o que importa alterar em termos metodológicos de abordagem do tema de modo a que se possa incorporar, no futuro, o conhecimento adquirido com este trabalho.

Introdução

O comportamento humano é a aplicação prática da decisão tomada, traduzindo-se num conjunto de procedimentos ou reações do indivíduo ao ambiente que o cerca durante um determinado período de tempo (Figura 1).



Figura 1: Comportamento humano

Ao indivíduo, são atribuídos determinados atributos que tornam possível a sua caracterização. Quanto ao ambiente, é tudo o que rodeia o indivíduo, no contexto em que este está inserido. O tempo é o período durante o qual o indivíduo está exposto a esse ambiente ou o tempo necessário para concretizar as ações que constituem o comportamento perante um estímulo [1-4].

Analisando a definição anterior sobre o comportamento humano numa situação de evacuação, constata-se que ele é influenciado pelo “ambiente” (edifício, o incêndio e outros ocupantes), pelo “tempo” (tempo decorrido entre o instante em que o ocupante recebe os primeiros estímulos provenientes do ambiente e o instante em que ele se encontra em segurança, no exterior do edifício)

e pelas variáveis do próprio “indivíduo”, nomeadamente as físicas (idade, género, limitação sensorial e estatura física), as fisiológicas (saúde, cansaço, tipo de vida, efeitos de álcool, drogas ou medicamentos) e, ainda, as psicológicas (experiência, atitude, estado emocional, formação, estado mental) [5]. Dos vários estudos sobre o comportamento humano em caso de incêndio, realçam-se as seguintes conclusões [6-19]:

- Os ocupantes tendem a usar os caminhos habituais, especialmente se não conhecem o edifício;
- Os ocupantes evitam zonas com fumo ou incêndio para abandonar o edifício;
- Os ocupantes seguem outros ocupantes;
- Os ocupantes comportam-se, muitas vezes, de maneira altruísta em situações de crise;
- A presença de liderança e de organização aumenta o comportamento adequado;
- Os ocupantes com mais formação agem de maneira muito mais racional;
- Pode haver diferença entre a atuação da mulher e do homem;
- Não há evidências de pânico perante uma situação de incêndio;
- Há um sentimento de segurança com a chegada dos meios de segurança;
- A experiência anterior pode alterar comportamentos perante uma nova situação;
- Os estímulos podem ser diversos e apenas um pode não ser suficiente para o ocupante abandonar de imediato o edifício;
- Quanto maior o número de pistas identificadas pelos ocupantes, maior é o impacto no comportamento;
- São realizadas atividades antes de abandonar o edifício, tais como, procurar informação do que está a acontecer, recolher os pertences ou fornecer informação verbal para abandonar o local;
- As mensagens de alarme são importantes para o início da evacuação;
- A presença de fumo faz com que ocupantes voltem para trás;
- Nem sempre os ocupantes sabem onde se localiza o incêndio ou qual é a emergência;
- Os ocupantes reentram no edifício após abandonar o mesmo;
- O tempo de reconhecimento é um dos fatores mais importantes do comportamento humano.

Relativamente aos modelos que tentam simular o comportamento humano no processo de evacuação, verifica-se que o fazem de um modo simplificado, dependendo da informação que o utilizador fornece ao modelo, informação essa que não tem sido até agora suportada por estudos que a fundamentem, nomeadamente no que diz respeito a tempos gastos com ações que não têm como objetivo a saída para o exterior do edifício [20-23].

A representação do comportamento nos modelos de evacuação de edifícios em caso de incêndio é muito limitada, devido principalmente à ausência da simulação do processo cognitivo do ocupante durante a situação de emergência [24, 25]. A este respeito, salientam-se as seguintes conclusões Lovreglio *et al.* [26]:

- O comportamento humano em caso de incêndio tem especificidades que variam de país para país, devido às características das suas populações serem distintas;
- A consolidação do conhecimento sobre o comportamento humano em caso de incêndio está ainda longe de estar estabilizada;
- A não consolidação do conhecimento nesta área decorre da natureza do evento em causa e da dificuldade de obter dados em situações reais;
- A utilização de Jogos Sérios para obter dados sobre o comportamento dos ocupantes em caso de incêndio é uma abordagem que poderá enriquecer o conhecimento, permitindo aperfeiçoar os perfis comportamentais;
- Inexistência de estudos que permitam quantificar o tempo associado às ações que os ocupantes realizam antes de decidirem abandonar o edifício;
- O tempo que os ocupantes gastam para realizar as diversas ações antes de decidirem abandonar o edifício, resultantes do seu comportamento ao incêndio, podem representar uma parte significativa do tempo total de evacuação.

Apresentação dos resultados do estudo desenvolvido

Como anteriormente referido, o comportamento humano depende das características dos ocupantes, do ambiente que se estabelece no decurso do incêndio no interior do edifício e, ainda, do espaço temporal durante o qual ocorre o incêndio. Com o objetivo de compreender o comportamento dos ocupantes e determinar quais os fatores que o influenciam, foram criados 4 inquéritos. O primeiro, designado de inquérito Tipo 1, teve como público-alvo as pessoas que estiveram envolvidas em incêndios. Quanto ao inquérito Tipo 2, é o resultado do aperfeiçoamento de um outro que já foi objeto de aplicação no âmbito da dissertação de mestrado desenvolvida por Elisabete Cordeiro [27], que na altura registou cerca de 300 respostas, tendo a consequente análise das respostas evidenciado algumas insuficiências do inquérito em causa. Um terceiro inquérito, com a designação Tipo 3, destinou-se a pessoas que participaram em simulacros. Finalmente, foi desenvolvido um quarto inquérito, designado de Tipo 4, destinado exclusivamente a bombeiros que tivessem participado em ações de combate a incêndios urbanos.

Tabela 1: Inquéritos

Inquéritos		Nº de inquéritos distribuídos	Nº de inquéritos recebidos	Percentagem de inquéritos recebidos
Tipo 1	Indústria	50	22	44%
	Habitação Amadora	20	4	20%
	Habitação Trofa	16	3	19%
Tipo 2	Público em geral**	*	1051	NA
Tipo 3	Exercícios	400	141	35%
	Exercícios	*	26	NA
Tipo 4	Bombeiros	***	34	NA
Total			1281	
* Divulgação através das redes sociais. Impossível quantificar o número de inquéritos distribuídos no total.				
** Dos 1051 inquéritos recebidos, 359 foram respondidos diretamente através da plataforma Google para inquéritos em 2015 e 403 em 2021. Os restantes foram entregues em papel.				
*** Distribuídos pelas principais corporações de bombeiros do País via email.				
NA: Não Aplicável.				

Com o objetivo de compreender o comportamento dos ocupantes e determinar quais os fatores que o influenciam, recorreu-se à análise inferencial para testar as diversas hipóteses criadas. No essencial, pretendeu-se obter novos conhecimentos sobre diversos aspetos relacionados com o comportamento das pessoas, com destaque para os seguintes:

- Pânico, ou não, dos ocupantes e fatores que determinam a sua ocorrência;
- Entrelajada entre ocupantes e fatores que determinam a sua ocorrência;
- Capacidade de identificarem o sinal de alarme e fatores que determinam essa capacidade;
- Interpretação do sinal de alarme e fatores que determinam essa interpretação;
- Reação dos ocupantes ao sinal de alarme e fatores que determinam essa reação;
- Influência da ligação do ocupante ao edifício na reação ao sinal de alarme;
- Acontecimentos que chamam a atenção do ocupante quando algo de invulgar está a acontecer e fatores que determinam esse alerta;
- Ações realizadas pelos ocupantes após tomarem consciência de que algo de anormal está a ocorrer e fatores que determinam a concretização dessas ações;
- Efeito do aconselhamento no abandono do edifício e fatores que determinam a reação a esse conselho;
- Fatores que influenciam a realização de tarefas pelos ocupantes, antes de decidirem abandonar o edifício;
- Reações dos ocupantes quando se deparam com fumo e fatores que determinam essas reações;
- Reações dos ocupantes ao se deparam com o incêndio e fatores que determinam essas reações;
- Caminho escolhido pelos ocupantes para deixar o edifício e fatores que determinam a sua escolha;

- Tendência para seguir outros ocupantes em edifícios que não conhece e fatores que determinam esse comportamento;
- Recolha de bens pessoais pelos ocupantes antes de abandonarem o edifício e fatores que determinam esse comportamento;
- Reentrada dos ocupantes no edifício e fatores que determinam esse comportamento;
- Consequências do incêndio que mais assustam os ocupantes e fatores que determinam essa reação de medo;
- Recolha de viatura antes de abandonar o edifício e fatores que determinam esse comportamento.
- Quantificação dos tempos de atraso na evacuação.

Comportamento Humano em caso de incêndio. A análise das respostas ao inquérito Tipo 2 evidenciou que a tendência prevalecente das pessoas é a de considerarem que, de uma forma geral, existe pânico numa situação de incêndio. Estes resultados foram confirmados pelas respostas aos inquéritos Tipo 1 e Tipo 4, com as limitações inerentes à dimensão da amostra relativa a essas respostas, pelo que se pode considerar que o pânico ocorre numa situação de incêndio. Importa, no entanto, ter presente que o pânico neste estudo foi interpretado pelos inquiridos como uma, ou mais, das seguintes manifestações:

- Agitação;
- Ansiedade;
- Choro e negação relativamente ao que estava a acontecer;
- Desespero devido à existência de ocupantes no interior onde se incluíam crianças;
- Desorientação;
- Estado de choque;
- Estado de excitação, alteração de voz e repetição de movimentos;
- Medo de perderem o emprego;
- Medo;
- Nervosos.

O **pânico** pode ocorrer numa situação de incêndio, mas com as respostas provenientes do inquérito não foi possível indicar quais as pessoas que manifestaram este estado. A informação que foi possível retirar é que, independentemente da faixa etária (FE), do género, das habilitações literárias (HL) e da formação em segurança contra incêndios (FSCI), as pessoas consideram que haverá pânico numa situação de incêndio.

A análise das respostas ao inquérito Tipo 2 sobre **interajuda**, evidenciou que a tendência prevalecente das pessoas é a de considerarem que existe o espírito de interajuda numa situação de incêndio, independentemente da FE, do género, das HL e da FSCI, sendo a ajuda a terceiros um dos motivos para reentrar num edifício, após o ter abandonado.

Analisando as respostas ao inquérito Tipo 2 sobre a **identificação do sinal de alarme**, verificou-se que a tendência prevalecente das pessoas é a de considerarem que nem todas identificam o sinal de alarme, constatando-se que a FE, as HL, o género e a FSCI poderão influenciar a capacidade de identificar o referido um sinal. As pessoas de mais idade, ou sem FSCI, ou do género feminino, evidenciaram ter mais dificuldade em identificar o sinal de alarme.

Sobre a **interpretação do sinal de alarme**, as respostas ao inquérito Tipo 2 evidenciou que a tendência prevalecente das pessoas é a de interpretarem o sinal de alarme como correspondendo a um incêndio, constatando-se que a FE, o género, as HL e a FSCI poderão ter influência na interpretação que é feita. Contudo, a análise da informação proveniente do inquérito Tipo 1 (indústria) e do inquérito Tipo 3, não confirmou a influência da FE, do género, das HL e da FSCI na interpretação do sinal de alarme. Há que salientar que no caso do exercício de evacuação (Tipo 3), o conhecimento da realização do mesmo influenciou a interpretação do sinal de alarme, isto porque a generalidade dos inquiridos interpretou esse sinal como correspondendo a um exercício de evacuação e não a um incêndio.

Outra informação relevante é se as atividades que os ocupantes estão a desenvolver podem ter influência na interpretação do sinal de alarme. Tanto no caso dos exercícios (inquérito Tipo 3),

como do incêndio real (inquérito Tipo 1), verificou-se que a interpretação do sinal de alarme não é afetada pela atividade que os ocupantes estão a fazer no momento em que tomam conhecimento desse sinal. Refere-se, finalmente, que o sinal de alarme nem sempre é suficiente para que os inquiridos saibam o que está a ocorrer, facto que é fundamental para os ocupantes terem uma reação adequada à situação.

A análise das respostas ao inquérito Tipo 2 sobre a **reação ao sinal de alarme** evidenciou que a tendência prevalecente das pessoas é a de procurarem saber o que se passa, constatando-se que a FSCI poderá ter influência na reação ao sinal de alarme. Da informação proveniente do inquérito Tipo 1 (Indústria), a reação mais indicada foi “deixar o local para sair do edifício”, não tendo sido indicado nenhuma vez “procurar saber o que se passa”. Nos exercícios (inquérito Tipo 3), mais uma vez, a reação mais indicada foi “deixar o local para sair do edifício”. A reação ao sinal de alarme poderá ser influenciada pela interpretação que é feita do mesmo e nem sempre o sinal de alarme, por si só, é suficiente para que as pessoas abandonem o edifício.

Analisando as respostas ao inquérito Tipo 2 sobre **alertar os ocupantes**, verificou-se que a tendência prevalecente das pessoas é a de considerarem que o alarme é o meio preferencial para indicar que algo de invulgar está a ocorrer. A informação obtida a partir dos inquéritos relacionados com situações reais de incêndio indicia que essa informação, por si só, pode não ser suficiente. De facto, embora as pessoas possam indicar que o alarme foi o responsável pelo alerta, uma análise mais detalhada evidenciou a influência de outros fatores relacionados com o incêndio.

Sobre a **ação realizada pelos inquiridos**, as respostas ao inquérito Tipo 2 evidenciaram que, quando confrontadas com uma situação anormal, procuram sobretudo “investigar o que estaria a acontecer” e “abandonar o local por iniciativa própria”, e que essas ações são independentes da FE, do género, das HL e da FSCI. Já nos inquéritos relativos a situações de incêndio e a exercícios de evacuação, constata-se que a resposta mais indicada foi interromper o que estava a fazer para abandonar o edifício, independentemente da FE, do género, das HL e da FSCI. A ação mais frequente perante o conhecimento de que algo de anormal está a acontecer será abandonar o edifício, não sendo essa ação influenciada pela FE, pelo género, pelas HL e pela FSCI das pessoas que estão a viver a situação. Contudo, há evidências de que apesar de as pessoas indicarem que irão abandonar o edifício, poderão efetuar diversas tarefas antes de concretizarem essa ação.

A análise das respostas ao inquérito Tipo 2 sobre **abandonar por indicação**, evidenciou que a tendência prevalecente das pessoas é a de abandonarem o edifício sem aguardar que alguém lhes peça para o fazerem. Contudo, os resultados dos inquéritos do Tipo 1 e do Tipo 3 mostram uma realidade que pode ser ligeiramente diferente, pois apesar de as pessoas ouvirem o sinal, poderão aguardar que alguém (ou o sistema de voz) lhes peça para abandonarem o edifício. O alarme por si só poderá não ser suficiente para que todos os ocupantes decidam abandonar o edifício, podendo existir alguns que só o fazem após a recomendação de alguém.

Analisando as respostas ao inquérito Tipo 2 sobre a **realização de tarefas antes de abandonar o edifício**, verificou-se que a tendência prevalecente das pessoas é a de realizarem uma ou mais tarefas antes de abandonarem o edifício, com destaque para o combate ao incêndio e ligar para avisar outros ocupantes.

A análise das respostas ao inquérito Tipo 2 sobre a **reação ao fumo** evidenciou que a tendência prevalecente das pessoas é a de tentarem encontrar outro caminho para abandonar o edifício. Contudo, esta tendência não foi confirmada pelos resultados dos inquéritos do Tipo 1, pois os ocupantes seguiram o caminho que estavam a percorrer. Esta reação irá depender em muito de como estará o caminho e se existem caminhos alternativos. Os ocupantes poderão ou não procurar caminhos alternativos ao se depararem com a presença de fumo proveniente do incêndio, dependendo das condições do caminho que estarão a percorrer e também poderá ser influenciado pelo género e se têm ou não FSCI.

Sobre a **reação ao deparar com o incêndio**, da análise das respostas ao inquérito Tipo 2 verificou-se que a tendência prevalecente das pessoas é a de tentarem outro caminho para abandonar o edifício. A análise das respostas ao inquérito Tipo 1 não confirma a tendência anterior, pois a grande maioria dos inquiridos que se depararam com o incêndio, continuaram a seguir o

caminho que estavam a percorrer. Os ocupantes poderão ou não procurar caminhos alternativos, mas isso dependerá das condições do caminho que estarão a percorrer, sendo o género masculino mais propício a combater o incêndio e o género feminino a pedir ajuda.

A análise das respostas ao inquérito Tipo 2 sobre o **caminho para abandonar o edifício**, evidenciou que a tendência prevalecte das pessoas é seguirem a sinalização para abandonarem o edifício, independentemente da localização. Há ainda uma percentagem significativa que escolheria, para abandonar o edifício, o caminho que utilizou para entrar. A análise evidenciou ainda que a escolha do caminho pode ser influenciada pela FE, pelo género, pelas HL, pela FSCI e, ainda, pelo piso onde se encontra (piso inferior ao plano de referência, piso no plano de referência, ou piso acima do plano de referência). Analisando os resultados provenientes dos inquéritos Tipo 1 e Tipo 3, verifica-se que a grande maioria dos inquiridos utilizou o caminho normal e que a atividade desenvolvida pelos ocupantes no momento em que tomam conhecimento do ocorrido pode influenciar a escolha. Além disso, também se verifica que os ocupantes não associam o caminho normal com uma saída de emergência.

Analisando as respostas ao inquérito Tipo 2 sobre **seguir outros**, verificou-se que a tendência prevalecte das pessoas é a de seguirem outras, caso estejam num edifício que não conheçam, sendo que o género e a FSCI podem influenciar seguir outros ou não, isto é, o género feminino é mais propício a seguir outros, bem como as pessoas sem FSCI.

Sobre **recolher bens antes de abandonar o edifício**, a análise das respostas ao inquérito Tipo 2 evidenciou que a tendência prevalecte das pessoas é a de não recolherem os seus bens antes de abandonar o edifício, sendo essa decisão independente da FE, do género, das HL e da FSCI. Tal tendência não foi confirmada pelos resultados da análise aos inquéritos do Tipo 1 e Tipo 3, pois dessa análise constata-se que antes de abandonar o edifício, os inquiridos recolhem os seus bens, verificando-se diferença caso se trate de um incêndio ou exercício, isto é, é proporcionalmente inverso. Os bombeiros confirmam que os ocupantes tentam retirar os seus bens do edifício.

A análise das respostas ao inquérito Tipo 2 sobre o **voltar a reentrar no edifício** evidenciou que a tendência prevalecte das pessoas é de reentrar no edifício sem autorização, nomeadamente para ajudar terceiros, independentemente da FE, do género, das HL e da FSCI. Analisando a informação proveniente do inquérito Tipo 1, verifica-se que são poucos os inquiridos que reentraram no edifício, informação que não é confirmada pelo inquérito Tipo 4, pois neste a maioria tenta reentrar sem autorização.

Tempos de atraso na evacuação. O tempo de evacuação pode ser dividido em 3 tempos, sendo eles: a) o tempo decorrido entre o instante em que o ocupante tem conhecimento do incêndio e aquele em que decide deixar o edifício; b) o tempo que necessita para efetuar tarefas e c) o tempo de movimento.

A análise das respostas ao inquérito Tipo 1 evidenciou que vários inquiridos demoraram entre 1 a 3 minutos entre o momento em que tiveram consciência de que algo estava a acontecer e aquele em que decidiram abandonar o edifício, mas também houve quem tivesse demorado mais do que 5 minutos. Relativamente ao tempo para a realização das tarefas, verificou-se que vários inquiridos demoraram menos do que 1 minuto, outros entre 3 a 5 minutos e alguns mais do que 5 minutos. Por fim, no que respeita ao tempo decorrido entre o instante em que tiveram consciência de que algo estava a acontecer e aquele em que saíram do edifício, a análise ao inquérito Tipo 1 evidenciou que vários inquiridos demoraram entre 2 e 5 minutos, embora haja indicação de que poderão ter demorado mais de 8 minutos. Subtraindo o tempo para realização das tarefas ao tempo decorrido entre o instante em que tiveram consciência de que algo estava a acontecer e aquele em que saíram do edifício, verifica-se que o tempo da realização das tarefas pode representar em média 50% do tempo total de evacuação.

Perfil Comportamental. Um dos objetivos iniciais desta investigação era a criação de perfis comportamentais, perante uma situação de incêndio. Como o número de respostas aos inquéritos (Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3) que permitiriam concretizar esse modelo comportamental foi reduzido,

optou-se por criar tendências³ de comportamento dos ocupantes (Modelo de tendências comportamentais dos ocupantes – MTO) com base nas respostas obtidas aos referidos inquéritos. Assim, no que se refere à interpretação e ações relatadas pelos inquiridos (inquérito Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3), as tendências foram as seguintes:

- Interpretação dada ao sinal de alarme:
 - Operações de manutenção do sistema: 9,0%
 - Exercício de evacuação: 15,7%
 - Falso Alarme: 18,1%
 - Incêndio real: 48,0%
 - Outra: 9,2%.
- Reação ao sinal de alarme:
 - Nenhuma: 7,7%
 - Deixa o local onde está para sair do edifício: 23,3%
 - Avisa terceiros para deixar o edifício: 8,7%
 - Aconselha terceiros a continuarem a sua atividade: 0,9%
 - Contacta os bombeiros: 3,8%
 - Procura saber o que se passa (telefona para a segurança, abre a porta para ver algo relacionado com o alarme, ...): 50,7%
 - Outra: 4,9%.
- Abandona o edifício somente se lhe dizem para o fazer:
 - Sim: 73,0%.
- Efetua tarefas antes de abandonar o edifício:
 - Sim: 93,0%.
- Reação ao deparar com fumo quando está a abandonar o edifício:
 - Investigar por curiosidade: 2%
 - Voltar para trás: 4%
 - Tentar outro caminho: 71%
 - Investigar para combater o incêndio: 23%.
- Reação ao deparar com o incêndio quando está a abandonar o edifício:
 - Tentar combater o incêndio: 21,5%
 - Voltar para trás: 2,8%
 - Tentar outro caminho: 54,9%
 - Pedir ajuda: 20,8%.
- Caminho que utiliza para abandonar o edifício:
 - Caminho que usa normalmente: 66%
 - Recorre à saída mais próxima: 34%.

No que se refere aos tempos associados à tomada de decisão e à execução das tarefas, as tendências foram concretizadas com base nas respostas ao inquérito Tipo 1 e ao inquérito Tipo 3, tendo resultado os tempos e percentagens a seguir indicadas:

- Tempos de decisão
 - Menos do que 1 minuto – 25%
 - Entre 1 minuto e 3 minutos – 49,4%
 - Entre 3 minutos e 5 minutos – 20,2%
 - Mais do que 5 minutos – 5,4%.
- Tempos para realização de tarefas
 - 0 minutos – 7%
 - Menos do que 1 minuto – 8%
 - Entre 1 minuto e 3 minutos – 59%
 - Entre 3 minutos e 5 minutos – 17%
 - Mais do que 5 minutos – 8%

¹ Estas tendências apresentam as limitações decorrentes da informação limitada que a suporta, tornando-se necessário estudos subsequentes que permitam obter informação adicional a partir da qual poderá, então, desenvolver-se o referido modelo comportamental.

Com base nas tendências anteriormente indicadas, foi criada uma aplicação com recurso ao *Excel* e programação *Visual Basic for Applications* (VBA) que permite quantificar as tendências comportamentais dos ocupantes que constituem o efetivo de um edifício. No sentido de verificar a influência desse MTO no tempo total de evacuação, recorreu-se ao *software Pathfinder* para simular a evacuação em 5 edifícios distintos, tendo sido criadas 3 simulações para cada arquitetura.

Na criação das arquiteturas dos edifícios foram tidas em consideração as exigências regulamentares da Portaria 1532/2008 de 29 de dezembro (na sua atual redação). Quatro das arquiteturas apresentam o mesmo efetivo total (1000 pessoas), estando a diferença nas áreas e no número de pisos, de acordo com o descrito a seguir:

- Arquitetura 1
 - Efetivo total: 1000
 - Pisos: 1
 - Área: 1000 m²
- Arquitetura 2
 - Efetivo total: 1000
 - Efetivo por piso: 500
 - Pisos: 2
 - Área por piso: 500 m²
- Arquitetura 3
 - Efetivo total: 1000
 - Efetivo por piso: 250
 - Pisos: 4
 - Área por piso: 500 m²
- Arquitetura 4
 - Efetivo total: 1000
 - Efetivo por piso: 125
 - Pisos: 8
 - Área por piso: 500 m²

O desenvolvimento destas 4 arquiteturas teve como objetivo verificar se os tempos de atraso têm o mesmo impacto no tempo de evacuação do edifício, caso haja, ou não, vias verticais de evacuação. Por fim a arquitetura 5 é referente a um hipermercado e resultou de uma adaptação de uma arquitetura disponível, gratuitamente, na *internet*²:

- Arquitetura 5
 - Efetivo total: 1825
 - Pisos: 1
 - Área por piso: 6026 m²

Simulações. Foram criadas 3 simulações distintas no *Pathfinder*, com as seguintes diferenças entre elas:

- Simulação 1: não foi previsto qualquer aspeto comportamental. Assim, os ocupantes iniciam a evacuação logo que é iniciada a simulação. A escolha dos caminhos é feita em função da proximidade às saídas. No entanto, quando o tempo de espera numa fila formada junto da saída inicialmente escolhida for superior ao tempo de deslocamento para outra saída, essa outra saída é escolhida.
- Simulação 2: foi inserido um tempo de espera (tempo de decisão) com base nas tendências criadas no âmbito desta investigação. A escolha da saída é ditada pela zona de influência, caso exista uma saída na proximidade. Se isso não se verificar, a escolha é feita com base nas tendências anteriormente referidas.
- Simulação 3: esta simulação difere da anterior, pelo facto de incorporar, ainda, um tempo de espera referente à realização de tarefas, baseado nas tendências criadas no âmbito desta investigação.

A distribuição dos ocupantes pelos pisos, realizada pelo *Pathfinder*, nas várias simulações concretizadas, foi aleatória. No caso da Simulação 2 e da Simulação 3, o MTO permite determinar um conjunto de informação que foi inserida no *Pathfinder*, isto é:

- Número de ocupantes associado a cada intervalo de tempo relativo à tomada de decisão;
- Número de ocupantes associado a cada intervalo de tempo relativo à execução de tarefas.

As simulações realizadas conduziram aos seguintes resultados:

- Simulação 1: não foi previsto o aspeto comportamental, os ocupantes seguem as regras básicas do *Pathfinder*, que distribui o efetivo pelos pisos de modo aleatório, encaminhando-os

² <https://dwgmodels.com/54-supermarket-1.html>

para a saída mais próxima, opção que pode ser alterada no decurso da simulação perante eventuais congestionamentos dessas saídas.

- Simulação 2: foi previsto o aspeto comportamental relacionado com a decisão dos ocupantes perante o conhecimento do incêndio, tendo sido introduzidos 4 tempos de atraso: 0 a 60 segundos, 61 a 180 segundos, 181 a 300 segundos e 301 a 480 segundos. De seguida, mediante a aplicação do MTO, fez-se a distribuição dos 1000 ocupantes nas 4 primeiras arquiteturas, tendo resultado a seguinte distribuição no tempo de atraso (tempo de decisão):
 - 0 a 60 segundos – 250 ocupantes
 - 61 a 180 segundos – 494 ocupantes
 - 181 a 300 segundos – 202 ocupantes
 - 301 a 480 segundos – 54 ocupantes

Quanto à arquitetura 5, referente ao supermercado, a distribuição foi a seguinte:

- 0 a 60 segundos – 456 ocupantes
 - 61 a 180 segundos – 902 ocupantes
 - 181 a 300 segundos – 369 ocupantes
 - 301 a 480 segundos – 98 ocupantes
- Simulação 3: Além do tempo de atraso referido anteriormente (tempo de decisão), foi também considerado o tempo referente às tarefas, tendo sido introduzidos 5 tempos de atraso: 0 segundos, 0 a 60 segundos, 61 a 180 segundos, 181 a 300 segundos e 301 a 480 segundos. Para cada comportamento associado ao tempo de decisão, foi feita uma distribuição dos ocupantes seguindo a distribuição dos tempos das tarefas:

- 0 a 60 segundos – 250 ocupantes
 - 0 minutos – 18 ocupantes
 - Menos do que 1 minuto – 21 ocupantes
 - Entre 1 minuto e 3 minutos – 148 ocupantes
 - Entre 3 minutos e 5 minutos – 42 ocupantes
 - Mais do que 5 minutos – 21 ocupantes.
- 61 a 180 segundos – 494 ocupantes
 - 0 minutos – 35 ocupantes
 - Menos do que 1 minuto – 42 ocupantes
 - Entre 1 minuto e 3 minutos – 292 ocupantes
 - Entre 3 minutos e 5 minutos – 84 ocupantes
 - Mais do que 5 minutos – 42 ocupantes.
- 181 a 300 segundos – 202 ocupantes
 - 0 minutos – 14 ocupantes
 - Menos do que 1 minuto – 17 ocupantes
 - Entre 1 minuto e 3 minutos – 120 ocupantes
 - Entre 3 minutos e 5 minutos – 34 ocupantes
 - Mais do que 5 minutos – 17 ocupantes.
- 301 a 480 segundos – 54 ocupantes
 - 0 minutos – 4 ocupantes
 - Menos do que 1 minuto – 5 ocupantes
 - Entre 1 minuto e 3 minutos – 32 ocupantes
 - Entre 3 minutos e 5 minutos – 9 ocupantes
 - Mais do que 5 minutos – 5 ocupantes.

Quanto à arquitetura 5, referente ao supermercado, a distribuição foi a seguinte:

- 0 a 60 segundos 456 ocupantes:
 - 0 minutos – 32 ocupantes
 - Menos do que 1 minuto – 39 ocupantes
 - Entre 1 minuto e 3 minutos – 270 ocupantes
 - Entre 3 minutos e 5 minutos – 77 ocupantes
 - Mais do que 5 minutos – 39 ocupantes.

- 61 a 180 segundos – 902 ocupantes
 - 0 minutos – 63 ocupantes
 - Menos do que 1 minuto – 76 ocupantes
 - Entre 1 minuto e 3 minutos – 534 ocupantes
 - Entre 3 minutos e 5 minutos – 153 ocupantes
 - Mais do que 5 minutos – 76 ocupantes.
- 181 a 300 segundos – 369 ocupantes
 - 0 minutos – 26 ocupantes
 - Menos do que 1 minuto – 31 ocupantes
 - Entre 1 minuto e 3 minutos – 218 ocupantes
 - Entre 3 minutos e 5 minutos – 62 ocupantes
 - Mais do que 5 minutos – 31 ocupantes.
- 301 a 480 segundos – 98 ocupantes
 - 0 minutos – 7 ocupantes
 - Menos do que 1 minuto – 8 ocupantes
 - Entre 1 minuto e 3 minutos – 58 ocupantes
 - Entre 3 minutos e 5 minutos – 17 ocupantes
 - Mais do que 5 minutos – 8 ocupantes.

Determinadas as distribuições anteriormente indicadas para cada uma das simulações, e inseridas no *Pathfinder*, este calcula o novo tempo de evacuação, apresentando-se na tabela seguinte o resultado das 3 simulações referentes a cada arquitetura.

Tabela 2: Tempos de evacuação das simulações

Nome do edifício	Pisos	Efetivo	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3
			Tempo de evacuação [s]. Simulação sem tempo de decisão nem tarefa.	Tempo de evacuação [s]. Simulação com tempo de decisão.	Tempo de evacuação [s]. Simulação com tempo de decisão + tarefa.
Arquitetura 1	1	1000	169,0	487,5	969,0
Arquitetura 2	2	1000	143,5	488,8	941,3
Arquitetura 3	4	1000	408,3	512,8	789,3
Arquitetura 4	8	1000	403,3	556,0	900,8
Arquitetura 5	1	1825	142,3	573,0	973,8

Da análise da Tabela 2, consta-se que o impacto dos tempos de atraso é superior nos edifícios em que não existem vias verticais de evacuação.

Conclusões

No presente estudo avaliou-se o perfil tendencial de comportamento dos ocupantes em caso de incêndio. As tendências comportamentais foram fundamentadas nas respostas aos inquéritos Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3. Apesar do número de respostas aos inquéritos ter sido inferior ao que era esperado, nomeadamente no que se refere ao desenvolvimento do modelo comportamental, a investigação veio confirmar alguns conhecimentos empíricos que são do domínio corrente e, ainda, evidenciar outros menos conhecidos. Com recurso a um modelo de simulação de evacuação foi avaliado o impacto desse perfil no tempo total de evacuação em diferentes edifícios que foram desenhados especificamente para o estudo. Do desenvolvimento deste estudo, resultaram diversas conclusões, das quais se destacam as seguintes, umas confirmando conhecimentos já relativamente consolidados e outras que indiciam tendências comportamentais específicas do País:

- Os resultados das simulações apresentadas neste artigo, fundamentadas no MTO criado com base na amostra dos inquéritos Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3, mostram que o tempo de decisão, bem como o tempo referente à realização de tarefas por parte dos ocupantes, pode influenciar significativamente o tempo total de evacuação. O tempo de atraso poderá influenciar em muito o tempo final de evacuação, sendo que o tempo para a realização das tarefas pode representar, em

média, 50% do tempo total de evacuação, verificando-se ainda que o impacto dos tempos de atraso é superior nos edifícios em que não existem vias verticais de evacuação;

- Na determinação do tempo de evacuação dos edifícios a componente relativa ao comportamento dos ocupantes tem um impacto decisivo, que não deve ser ignorado, quer se recorra a um método de cálculo ou a um modelo de simulação. De facto, os tempos obtidos sem a consideração dos aspetos comportamentais não refletem o tempo total de evacuação, sendo variável o diferencial existente e dependendo do tipo de edifício.

Referências

- [1] B. F. Skinner, *Ciência e comportamento humano*, J.C.T.R. AZZI, Trans. M. Fontes Ed., (2003).
- [2] J. P. Keating, *The Myth of Panic*. Fire Journal, 77 (1982).
- [3] N. R. Johnson, *Panic at the "Who Concert Stamped": An Empirical Assessment*, *Social Problems*, 34, 11 (1987).
- [4] O. Qiong, *A Brief Introduction to Perception*, CS Canada, 15, 10 (2017). doi:10.3968/10055
- [5] K. Lewin, *Field theory in social science: selected theoretical papers*, Edited by Dorwin Cartwright, Oxford, England: Harpers (1951).
- [6] A. L. Coelho, *Modelação Matemática da Evacuação de Edifícios sujeitos à Acção de Um Incêndio*, Universidade do Porto (1997).
- [7] H. Yoshimura, *Human behaviour in fires*, Paper presented at the 4th Proceedings of the Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology, Japan (2000).
- [8] M. Antić, *Contribution Of Social Psychology For Understanding Of Human Behavior During Fire Emergency*, *Applications of Structural Fire Engineering* (2015). doi:10.14311/asfe.2015.078
- [9] R. Fahy and G. Proulx, *Analysis of Published Accounts of the World Trade Center Evacuation. Federal Building and Fire Safety Investigation of the World Trade Center Disaster*, NIST NCSTAR 1-7A (2005).
- [10] R. Fahy and G. Proulx, *Human Behavior In The World Trade Center Evacuation*, 5 (1997) 713-724.
- [11] J. Averill, D. Mileti, R. Peacock, E. Kuligowski, N. Groner, G. Proulx and H. Nelson, *Federal Investigation Of The Evacuation Of The World Trade Center On September 11, 2001*. Paper presented at the 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire Symposium 2009, Robinson College, Cambridge, UK, July (2009) 13-15.
- [12] N. C. McConnell, K. Boyce and T. J. Shields, *An Analysis Of The Recognition And Response Behaviours Of Evacuees Of WTC 1 On 9/11*. Paper presented at the 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire Symposium 2009, Robinson College, Cambridge, UK, July (2009) 13-15.
- [13] N. Oberijé, M. Kobes, J. Weges and J. Post, *Fire In Euroborg Football Stadium; Analysis Of Human Behaviour*, Paper presented at the 4th International Symposium on Human Behaviour in Fire Symposium 2009, Robinson College, Cambridge, UK, July (2009) 13-15.
- [14] G. Proulx and I. Reid, *Occupant Behavior and Evacuation During the Chicago Cook County Administration Building Fire*, 16 (2006) 283-309.
- [15] P. Zhang, L. Yang, S. Lo, Y. Gao, F. Dong, F. Peng and J. Jiang, *Investigations of Human Psychology and Behavior in the Emergency of Subway* (2020).

- [16] K. Żydek, M. Król and A. Król, *Evacuation Simulation Focusing on Modeling of Disabled People Movement*, 13(4) (2021) 2405.
- [17] E. C. Cordeiro, A. Leça Coelho, M. Nepomuceno and J. Craveiro, *A modelação do comportamento dos portugueses em caso de incêndio*, International Conference on Engineering: Engineering for Society (ICEUBI2015), Covilhã, Portugal (2015).
- [18] E. Cordeiro, A. Leça Coelho, M. C. S. Nepomuceno and J. Craveiro, *Comportamento humano em caso de incêndio*, 5.as Jornadas de Segurança aos Incêndios Urbanos (5.as JORNINC), LNEC, Lisboa, Portugal (2016).
- [19] E. Cordeiro, A. Leça Coelho and M. C. S. Nepomuceno, *Comparison between the human reactions in a simulacrum and in a real fire situation*, Fire and Evacuation Modelling Technical Conference 2016 (FEMTC 2016), Torremolinos, Spain (2016).
- [20] E. Kuligowski and R. Peacock, *A Review of Building Evacuation Models 1st Edition*, Technical Note 1471, National Institute of Standards and Technology, (2005)
- [21] E. Kuligowski. *Modeling Human Behavior during Building Fires*, NIST (2008).
- [22] E. Kuligowski, R. Peacock and B. Hoskins, *A Review of Building Evacuation Models*, 2nd Edition, National Institute of Standards and Technology (2010).
- [23] E. Kuligowski, *Human Behavior in Fire*, In SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, (2016) 2070-2114
- [24] Gwynne, *Human Behaviour In Fire@ Model Development And Application* (2015).
- [25] E. Carattin and V. Brannigan, *Science or Science Fiction? The Use of Human Behavioral Models in Fire Safety Regulation* (2013).
- [26] R. Lovreglio, E. Ronchi and D. Nilsson, *An Evacuation Decision Model based on perceived risk, social influence and behavioural uncertainty*, Simulation Modelling Practice and Theory, 66 (2016) 226-242. doi:10.1016/j.simpat.2016.03.006
- [27] E. C. Cordeiro, *Modelação do comportamento das pessoas em caso de incêndio*, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências e Tecnologias da Universidade de Coimbra (2006).

Literature review on the contribution of energy retrofitting of existing residential building stock to achieve energy sustainability: the case of Jordan

ALMOMANI Ahmad^{1, a}, BARREIRA Eva^{2, b} and ALMEIDA Ricardo^{3, c}

¹ Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, 4200-465 Porto

² CONSTRUCT-LFC, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, 4200-465 Porto

³ Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Viseu, Campus Politécnico de Repeses, 3504-510 Viseu

^aup202103251@edu.fe.up.pt, ^bbarreira@fe.up.pt, ^cralmeida@estv.ipv.pt

Keywords: Energy efficiency, Energy retrofitting, Residential buildings, Review, Jordan

Abstract. Energy sustainability is a world's significant concern in the 21st century. In Jordan, two critical challenges are exacerbating the energy security issue: 1) the political instabilities of the surrounding countries (e.g., Syria), which caused an increment in population and thereby in energy demand; 2) the lack of natural resources, with 94% energy imports of the total energy needs. Thus, optimizing energy consumption and seeking alternative energy resources, renewable energy, is necessary to overcome the abovementioned challenges. Buildings consume more than 40% of the total energy consumption worldwide, primarily for heating and cooling, producing up to one-third of total GHG emissions. In Jordan, the number of existing buildings is higher than that of new buildings, and residential buildings represent 86.1% of the total building stock. Therefore, optimizing the energy performance of the existing residential buildings through green retrofitting can have a higher effect on energy sustainability. This study aims to present a comprehensive review of the existing literature on the trends of residential buildings' energy retrofitting in Jordan. An extensive keyword-based search was carried out through the SCOPUS database to identify the studies under the subject area in Jordan. A total of 14 relevant studies were accumulated and critically analysed under four main themes, that have been used in earlier global review studies, to identify gaps in the literature. It is observed that only two studies have been conducted to cover the three dimensions of sustainability. Also, there is a lack of research that present the measure and verification of an implemented energy retrofitting project, namely, the pre- and post-retrofitting measurement and verification. Furthermore, none of the included studies performed a BIM-based approach to energy retrofitting.

Introduction

One of the 21st century's primary concerns is energy sustainability. The greenhouse gas (GHG) emission that results from the traditional ways of producing and consuming energy introduces harmful effects on the global climate and might cause issues, such as global warming, that could threaten the health and well-being of humans [1]. Also, traditional energy resources, such as fossil fuels, are draining over time, pushing for the discovery of alternative energy resources, such as solar and wind [2]. Buildings consume more than 40% of the total energy consumption worldwide, primarily by using fossil fuels for heating and cooling, producing up to one-third of total GHG emissions [3]. Thus, implementing buildings with high performance in energy consumption is crucial to overcome the abovementioned challenges.

Energy is one of the Sustainable Development Goals (SDGs) introduced by the United Nations in 2015, namely SDG#7, that plays a vital role in the achievement of other SDGs, such as providing

clean water (SDG#6) and mitigating climate change (SDG#13). For instance, Jordan consumes 15% of its total electrical energy to supply clean and usable water for its citizens [4]. Moreover, the transportation and residential sectors are the dominant energy consumers worldwide [6]. For instance, Jordan's transportation and residential sectors consume around 47% and 25.3% of the total energy, respectively. In the transportation sector, one of the research trends is to focus on replacing the burning of fossil fuels by innovating electric vehicles. Such an innovation expects an increase in demand for electrical energy in residential buildings [7], especially in countries that lack grid infrastructures for charging electric vehicles, such as Jordan. In that case, the demand for electrical energy will increase in residential buildings to charge electric vehicles. Hence, optimizing residential buildings' energy performance, including installing renewable energy systems, is essential to cope with the increasing energy demand.

Withstanding the above, the energy demand for residential buildings will increase, and governments of both developed and developing countries are working toward minimizing that by enhancing the energy efficiency of buildings and relying on green sources of energy, renewable energy. The construction sector is crucial in improving buildings' energy efficiency by designing new energy-efficient buildings, modifying existing buildings through energy retrofitting, and installing renewable energy systems. While the number of existing buildings is higher than the number of new ones, applying energy efficiency to existing buildings might significantly impact energy sustainability [8]. For instance, in Jordan, residential building stock represents 86.1% of the total buildings, consuming more than 44% of the total electrical energy consumption [9]. Therefore, studies focusing on improving the energy performance of existing residential buildings are necessary for the country's development.

Nowadays, several studies have been demonstrated in the literature about retrofitting existing residential buildings in Jordan. However, energy retrofitting of existing buildings is an evolving topic that continually updates, and proper implementation of retrofit programs requires multiple studies of different natures. Thus, a comprehensive literature review to analyse the existing studies is required to identify the gaps in knowledge and propose directions and recommendations for future research in Jordan. To the author's best knowledge, there is a lack of review studies focusing on retrofitting existing residential buildings in a specific country. Such studies are needed since energy retrofitting depends on the geographical location, including the building types and characteristics, climatic conditions, local market conditions, and behaviours of occupiers [10]. Moreover, some authors highlighted the importance of reviewing papers on a specific country as their future research agenda [11]. Hence, this review aims to cover the gap by comprehensively reviewing the studies of energy retrofitting existing residential buildings in Jordan.

This review continues as follows: section 2 provides a brief background about the geopolitical condition of Jordan; section 3 illustrates the review methodology; section 4 demonstrates initial remarks on the themes used to analyse papers; section 5 illustrates the resulting studies with critical discussions based on the selected themes; section 6 presents the conclusions of this review.

Jordan in the geopolitical context

This section illustrates Jordan's geography and political conditions under three points: 1) Climatic conditions, 2) Population growth and energy demand, and 3) scarcity of energy resources. These factors influence energy retrofitting operations and decision-making processes [12].

Based on the Koppen climate classification, Jordan has five different climate zones (Figure 1): 1) the hot arid desert (BWh), which covers major cities such as Aqaba and Al-Ruwaished, 2) the cold arid desert (BWk) such as Ma'an, 3) The hot semi-arid (BSh) covers cities in the center of Jordan, such as the capital Amman, 4) The cold arid steppe (BSk) such as Mafraq, 5) the temperate climate with dry and hot summers (CSa) covers few cities in the north, such as Irbid [13]. The variety of climatic zones offers different heating and cooling demands in buildings. Thus, requiring various energy optimization solutions [12].

Moreover, the increase in population can significantly increase energy demand. In Jordan, the population growth rate has increased in the recent two decades. The main reason for the population

growth is the political instability due to civil wars in the surrounding countries throughout the past two decades, such as the Syrian and Iraqi civil wars. These wars forced many refugees to leave their countries and settle in Jordan. For instance, during the Gulf war in the 1990s, many Iraqi citizens were allocated to settle in Jordan. Also, between 2005 to 2013, due to the Syrian civil war, 750,000 Syrian refugees left their country to live in Jordan [14]. As a result, the rapid population growth increased energy demand, as shown in figure 2.

Finally, the scarcity of natural resources and the increasing demand for energy, which is growing by 3% annually, make Jordan import around 94% of its oil and fossil fuel for energy supply [14]. The residential sector is responsible for most electricity consumption; the consumption increased from around 30% in 1990 to 49% in 2020 (Figure 3). Also, the heating and cooling loads are the most consumed energy in buildings (Figure 4), indicating residential buildings' thermal inadequacy [15]. Thus, improving the energy efficiency of residential buildings is of importance to the energy sustainability in Jordan.

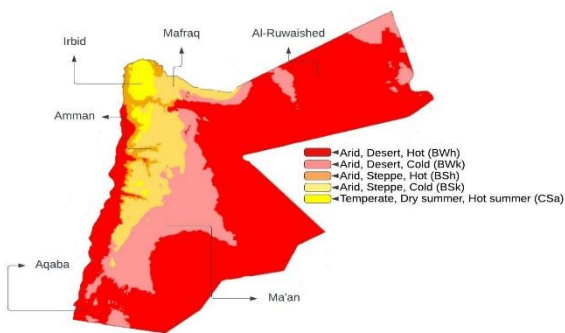


Figure 1: Jordan climatic zones

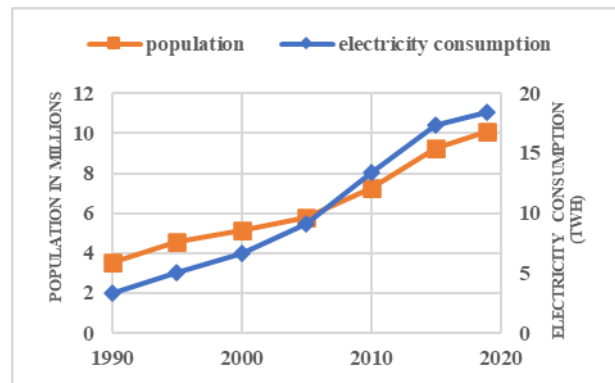


Figure 2: Population vs electricity consumption in Jordan

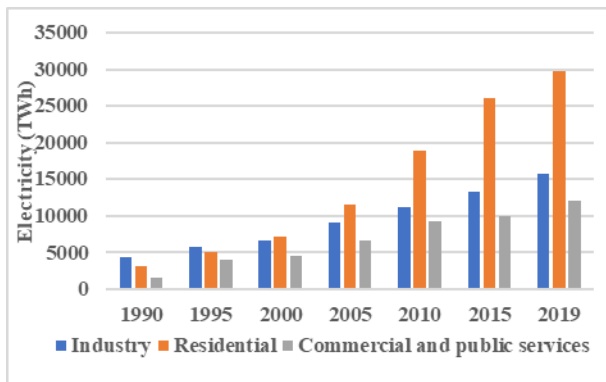


Figure 3: Electricity consumption in Jordan by sector

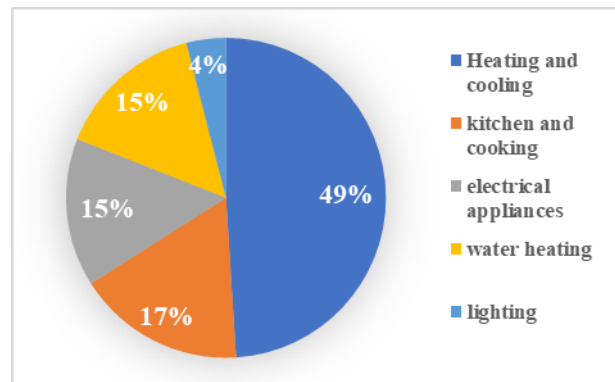


Figure 4: electricity consumption in residential buildings

Methodology

A two-stages methodology is applied in this review: (i) an extensive keyword-based search through SCOPUS databases, and (ii) identifying the themes through the full reading of the selected studies. The following subsections illustrate the methodology stages.

Data collection method. The collection of data (stage one) was divided into two phases, in phase one the authors conducted a search in SCOPUS¹ database using the following keywords:

- Energy AND (Retrofit OR Rehabilitation) AND Residential AND Building.

Using the advanced searching tools, filters, in SCOPUS, the author limited the search to: 1) Years of research: between 2010 to 2022, 2) Document type: journal articles and reviews, and 3) documents language: English. A total of 60 studies were collected, and the abstract and conclusion were saved to a referencing software for phase two.

¹ The search was conducted on 18th, July 2022.

In phase two, a preliminary screening of the abstract and conclusion of each of the saved studies was carried out to apply the following eligibility criteria:

- Studies should evaluate energy retrofitting of residential buildings in Jordan using at least one residential building case study.
- Studies should use dynamic modelling tools to measure the energy conservation achievable by implementing at least one of the Energy Efficiency Measures (EEMs).

For the exclusion criteria, as this review focus on residential buildings, other types of buildings were not considered. Also, this review includes the energy retrofitting of existing residential building studies only, hence, studies pertaining to the design of new energy-efficient residential buildings were not included, such as the design of new net or near zero energy buildings (NZEBs).

Stage two of the methodology included reading the selected studies and deeply analysing each study's components in order to consider it in this review. Also, the full reading of the studies allowed defining the key themes for the analysis as shown in the next subsection.

Identifying the key themes. The selection of the key themes was based on a full reading of the selected studies, supported by reviewing some of the global review studies on the topic. A full reading of the chosen studies identified four main themes with various categorizations, as shown in Table 1. Section 4 provides initial remarks on each theme.

In addition, the analysis of global review studies on energy retrofitting of buildings illustrates the importance of the selected themes [10,16]. For instance, Hashempou et al. [16] investigated the energy performance optimization of existing buildings by reviewing 153 articles using seven themes: decision-making model, measures and variables, optimization objectives and criteria, software tools, optimization methods, and Case studies on geographical locations and building types. Recently, Ahmed and Asif [10] reviewed the literature on retrofitting existing residential buildings in the Arab Gulf Countries using four main themes: study approach, pre- and post-retrofitting, types and numbers of EEMs, and software tools.

Table 1: Themes used to analyse retrofit studies in Jordan

Sustainable retrofitting assessment	Pre and post retrofit measurement and verification	Type and number of EEMs	Software tools
1st order	Yes (method used)	Single	BEM software
2nd order	No	Multiple	BIM application
3rd order			

Initial remarks of the selected themes

Sustainable retrofit assessment. Sustainability, or sustainable development, was first introduced by the Brundtland Commission report, our common future, as the development that “meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs” [17, p.24]. The achievement of sustainable development requires covering three main dimensions: environmental, social, and economic [18]. Focusing on one of the three dimensions while ignoring others is problematic, especially that the three dimensions of sustainability are interrelated to each other, and sustainability can exist only by including all dimensions [18]. However, Edum-Fotwe and Price [19] argued that there are three orders of sustainability: the first order considers only each dimension separately, the second order when two dimensions are considered on the expense of the third one, and in the 3rd order the three dimensions are taken into consideration (Figure 5). They further argued that the 3rd order of sustainability is, unfortunately, rarely applied in any urban development projects.

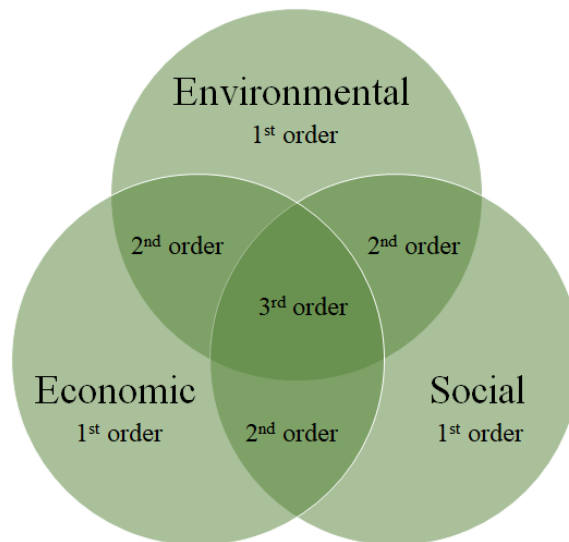


Figure 5: Triple bottom line of sustainability (Adapted from [19])

In light with the above, most of the research concern to the energy retrofitting of existing residential buildings focus on the environmental benefits with little attention to the economic and social dimensions [20]. However, in the recent years the consideration on the second order of sustainability is increasing in the research of existing buildings retrofitting by focusing on the economic feasibility of retrofitting programs. Yet, third order of energy sustainability is rarely addressed, especially the social dimensions which includes several indicators that connected to the environmental and economic dimensions, such as thermal comfort and increment of employment rate [19]. The “business case for green buildings” report published by the World Green Building Council (WGBC) argued that there is mature research on energy sustainability that focus on the environmental dimension, and the focus should move to include economic and social dimensions [21]. Moreover, the inclusion of the three dimensions can help in the decision-making process to produce schemes for the retrofitting of the residential buildings stock, on country level and worldwide [8]. Therefore, conducting studies that covers the three dimensions of sustainability are needed to provide actions and decisions to the energy retrofitting of existing residential buildings in Jordan and can help in developing proper schemes and policies to achieve decarbonization transition targets.

Pre and post retrofit measurement and verification (M&V). Pre- and post-retrofitting measurement and verification (M&V) are necessary steps to validate buildings’ energy retrofitting programs. The M&V process includes conducting experimental measurements to calibrate the design of buildings’ energy models or to validate the actual energy saving of retrofitted buildings [10,22]. It can also include validating economic and social parameters, such as actual costs of retrofitting programs and indoor air quality (IAQ) [23]. A review study by Ma et al. [12] illustrated three general phases for energy retrofitting projects: pre-retrofitting, implementation (construction), and post-retrofitting. Within these phases, several processes and tasks should be done to conduct energy retrofitting of buildings. Figure 6 illustrates the phases, processes, and tasks of building energy retrofitting.

The pre-retrofitting phase might include several assumptions due to the unavailability of information on existing buildings’ geometries and energy-related data, such as the thermal characteristics of buildings components or the outdoor climatic conditions. Hence, pre-retrofitting M&V is necessary to validate these assumptions and calibrate buildings’ energy models. Several measurement tools can be used to calibrate the design models. For example, electrical energy bills can be used to collect the actual energy consumption and compare it with the simulated one. Another example is using sensors that measure the actual IAQ parameters (temperature, relative humidity, and CO₂ content), which can be compared with the simulated IAQ parameters. For instance, Aldossary et al. [23] validated the energy model through electrical energy bills, and

Synnefa et al. [22] validated the energy model using smart meters (to calculate energy consumption before retrofitting) and IAQ sensors.

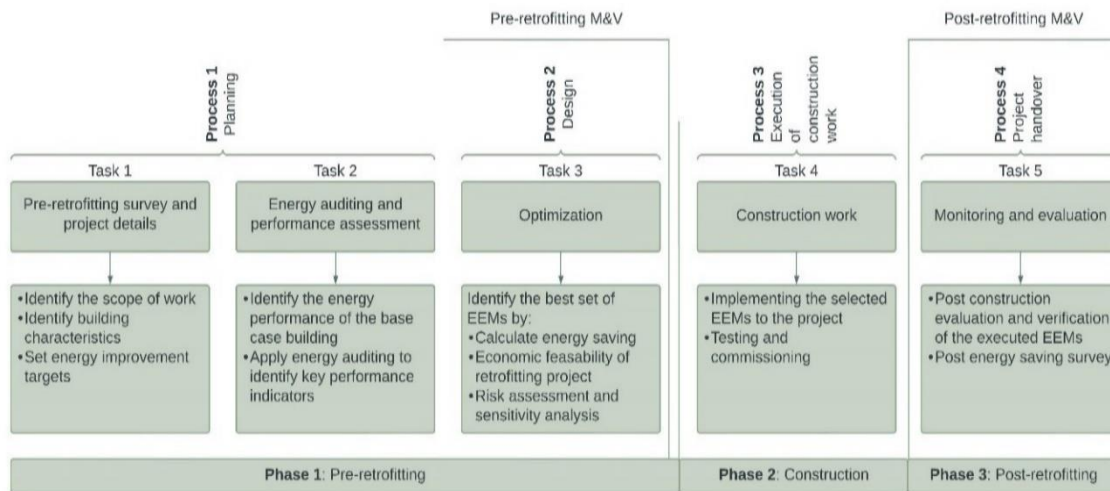


Figure 6: Phases of energy retrofitting projects (Adapted from: [12])

On the other hand, post-retrofitting M&V is the process of validating the retrofitted buildings after implementing the EEMs [12]. For instance, in [22], the authors conducted the post retrofitting M&V by 1) calculating the energy saving by comparing the energy consumption before and after implementing the EEMs, 2) investigating the energy performance of the building's envelope using infrared thermography before and after implementing EEMs, 3) calculating IAQ parameters before and after implementing EEMs.

To summarize, pre- and post-retrofit M&V processes are essential to validate buildings' energy retrofitting programs. The former is necessary to calibrate the design of buildings' energy models, and the latter is crucial to validate the outcomes of buildings' energy retrofitting programs. Such validations are vital to make decisions on the retrofitting actions in Jordan. Therefore, the literature on energy retrofitting existing residential buildings should include studies that present pre- and post-retrofitting M&V processes.

Number and type of Energy Efficiency Measures (EEMs), Various types of EEMs can be used to improve the energy performance of existing residential buildings. The review study of Ma et al. [12] illustrated three categories of EEMs: 1) demand side, 2) supply side and 3) human factor. The first category works to reduce the energy demand in existing buildings, and it can be divided into two types: the passive design measures, which mainly concern with improving the thermal properties of the building envelope, and the active design measures, which include the appliances in buildings. The second category works by supplying buildings with alternative energy sources, such as solar and wind systems. Finally, the human factor category depends on occupiers' energy consumption behaviours.

Energy retrofitting studies can use a single EEM or multiple numbers of EEMs. In the latter, some studies compare the energy performance of buildings after applying a single EEM or sets of EEMs to identify the optimum EEMs for improving buildings' energy performance. Moreover, some studies consider the costs of EEMs to check the economic feasibility of EEMs applications. Recently, more studies started to focus on the whole house retrofit by applying a package of EEMs to select the optimum set of EEMs that reduce the energy consumption of buildings aiming to accelerate the decarbonization targets achievement [24].

Simulation software. The construction industry has introduced several emerging dynamic energy modelling technologies that can help in measuring the improvement of buildings' energy consumption, such as the use of Building Energy Modelling (BEM) and Building Information Modelling (BIM) [25]. These technologies allow a comparison between buildings' energy performance before and after applying EEMs. A wide range of BEM software can be utilized to simulate the energy performance of residential buildings, such as EnergyPlus, DesignBuilder, IES-VE, TRNSYS, IDA ICE 4.8, and Green Building Studio. However, selecting BEM software

depends on several reasons, such as the expertise and simplicity of using the BEM software, and the purpose of simulation.

Moreover, BEM can be linked with BIM authoring tools and procedures for energy retrofitting of existing buildings. Connecting BEM with BIM has numerous advantages throughout the life cycle of energy retrofitting projects, such as minimizing the data acquisition efforts and monitoring and evaluating the energy retrofitting programs [26]. Sanhudo et al. [26] comprehensively reviewed the literature on BIM and BEM and presented a BIM-based framework to retrofit existing buildings. Ahmed and Wasif [27] applied the framework of [26] to optimize the energy performance of existing residential buildings in Saudi Arabia. They exported the BIM model, designed using Rivet software (BIM authoring tool), and imported it to DesignBuilder through the gbXML scheme to simulate the energy. However, some authors reported that the framework does not present the full potential of using BIM [10]. Therefore, there is a need for more studies to develop a comprehensive framework for the energy modelling of existing buildings.

Results and discussion

Characterization of the selected studies. The search resulted in finding 14 relevant studies conducted in Jordan. Table 2 illustrates the papers included in this review with the year of publications and authors' surnames. The publication date for most studies was during the past five years, with only [39] published in 2011, as shown in Figure 7. Moreover, the year with the most publications is 2021, with five studies. Such findings indicate that the energy retrofitting of existing residential buildings is a trending research topic under development in Jordan.

Table 2: Characterization of the selected studies

Ref	Year	Author(s) surname
[3]	2018	Bataineh and Alrabee
[13]	2020	Albatayneh, Assaf, Jaradat, Alterman
[28]	2020	Almuhtady and Alfaouri
[29]	2021	Bataineh and Ali
[30]	2022	Abu Qadourah, Al-Falahat, Alrwashdeh, Nytsch-Geusen
[31]	2022	Bataineh and Alrabee
[32]	2022	Bataineh and Alrabee
[33]	2022	Monna, Abdallah, Juaidi, Albatayneh, Zapata-Sierra, Manzano-Agugliaro
[34]	2021	Albatayneh
[35]	2021	Albatayneh
[36]	2021	Albatayneh, Tayara, Jaradat, Al-Omary, Hindiyyeh, Alterman, Ishbeytah
[37]	2021	Albatayneh, Juaidi, Abdallah, Manzano-Agugliaro
[38]	2020	Mabdeh, Ahmad, Alradaideh, Bataineh
[39]	2011	Jaber and Ajib

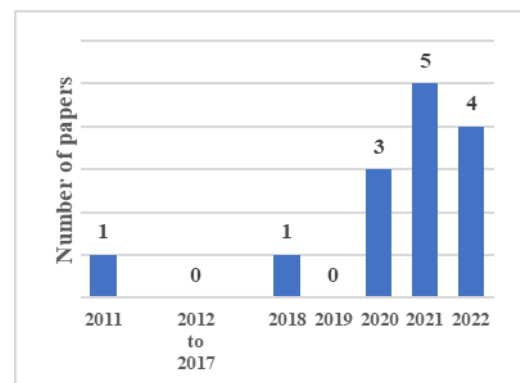


Figure 7: Number of the energy retrofitting residential building studies per year.

Sustainable retrofitting assessment. As discussed earlier in this review, the inclusion of the three main dimensions of sustainability is of importance for the decision-making processes of buildings' energy retrofit. The analysis of the selected studies (Table 3) illustrates that 71.4% of them focused on the first order of sustainability, only considering the environmental dimensions, including energy saving and the reduction of CO₂ emissions (Figure 8). For instance, Bataineh and Ali [29] optimized the energy performance of a multifamily building in Amman. Using DesignBuilder software, they applied six different EEMs include improving thermal insulation of exterior walls and roofs, window-to-wall ratio, windows thermal insulation, lighting, and cooling setpoint temperature and found that after applying these EEMs the annual energy consumption reduced by 25%, 30%, 41.34%, 56.6%, and 18%, respectively. Other similar examples can be found in [36,37].

On the other hand, for the second order of sustainability, the analysis indicates that 14.3% of the selected studies consider both the environmental and economic dimensions (Figure 8). For example,

in [39], Jaber and Ajib investigated the optimum cost-effective set of EEMs for improving the energy performance of a typical building in Jordan. Considering the orientation of buildings, they applied three different EEMs, namely, window size, and wall and roof thermal insulation using TRNSYS for the energy analysis. They found that the energy consumption could be reduced by 25.31% when applying glazing to windows and insulating the roof and walls with 13 cm and 20 cm of polystyrene, respectively. From the economic dimension, they highlighted that the implementation of EEMs increases the costs by 23.54%; however, it reduces the total life cycle costs (considering the life span of the building, heating systems and all passive systems as 30 years, and cooling system as 10 years) by 11.67%.

Finally, only two studies [3,31] (representing 14.3% of the studies as shown in Figure 8) consider the three dimensions of sustainability. Bataineh and Alrabee conducted both studies to investigate the optimum sets of EEMs for improving residential buildings' energy performance using DesignBuilder. In both studies, nine EEMs were considered and divided into three levels of retrofitting. However, in [3], they investigated three types of buildings (a traditional family house, an apartment building, and a two-story villa) located in Irbid (CSa). On the other hand, [31] focused on one type of building (two-story villa) but applied the analysis in three different climatic zones. The outcome of [3] and [31] illustrate the environmental, economic, and social benefits of implementing retrofitting to existing residential buildings.

To sum up, the finding illustrates that there is a lack of studies that concern the three dimensions of sustainability, especially the social dimension, such as the thermal comfort and indoor air quality inside buildings. Such findings indicate that the environmental dimension is matured in research, and the economic and social needs more development [20,21].

Table 3: Sustainable retrofitting assessment of the selected studies

Ref	Order of sustainability	Environment	Economic	Social
[3]	3rd order	Yes	Yes	Yes
[13]	1st order	Yes	No	No
[28]	1st order	Yes	No	No
[29]	1st order	Yes	No	No
[30]	1st order	Yes	No	No
[31]	3rd order	Yes	Yes	Yes
[32]	2nd order	Yes	Yes	No
[33]	1st order	Yes	No	No
[34]	1st order	Yes	No	No
[35]	1st order	Yes	No	No
[36]	1st order	Yes	No	No
[37]	1st order	Yes	No	No
[38]	1st order	Yes	No	No
[39]	2nd order	Yes	Yes	No

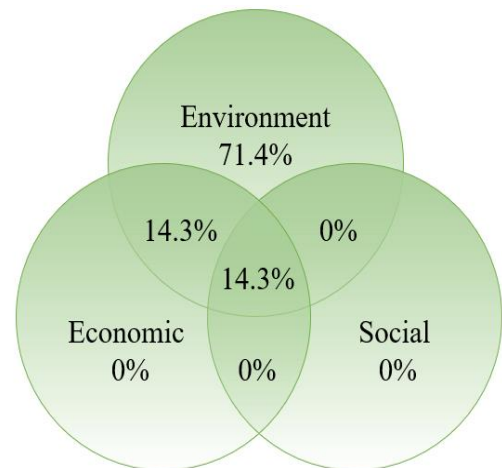


Figure 8: Percentage of studies covering the three dimensions of sustainability

Pre and post retrofitting M&V. The application of pre-and post-retrofit M&V in each of the 14 studies is presented in Table 4. It can be noted that there is a lack of study that calibrates building models and validates the retrofitting programs. Four studies considered the calibration of building models [3,29,31,32]. For instance, in [3], the validation was based on previous works found in the literature that were conducted in surrounding countries. Another example is shown in [29], where the model was calibrated using electricity bills. Also, in [31,32], the models were validated by calculating the energy consumption of HVAC systems in one room and comparing it with the simulation result. On the other hand, none of the studies included post-retrofit M&V. This indicates a crucial gap in the existing literature as post-retrofitting provides an empirical validation to building owners on the benefits of energy retrofitting. Without pre- and post- retrofitting M&V, the energy retrofitting programs will not be validated.

Table 4: Pre- and post-retrofit M&V applications in the selected studies

Reference	Model calibration	Method for calibration	Post-retrofit monitoring	Monitoring and evaluation method
[3]	Yes	Comparison with previous studies	No	N/A
[13]	No	N/A	No	N/A
[28]	No	N/A	No	N/A
[29]	Yes	Energy bills	No	N/A
[30]	No	N/A	No	N/A
[31]	Yes	Measuring sensors for electricity use	No	N/A
[32]	Yes	Measuring sensors for electricity use	No	N/A
[33]	No	N/A	No	N/A
[34]	No	N/A	No	N/A
[35]	No	N/A	No	N/A
[36]	No	N/A	No	N/A
[37]	No	N/A	No	N/A
[38]	No	N/A	No	N/A
[39]	No	N/A	No	N/A

Number and type of EEMs. Most studies applied multiple EEMs to energy retrofit the existing residential buildings in Jordan, as shown in Table 5. Most of the studies used demand-side EEMs that focus on improving the building envelope, except Monna et al. [33], as they focused on the supply side by installing photovoltaic panels on the buildings' roofs. This literature review also indicates a lack of studies investigating energy retrofitting by including both the demand and the supply. Only Almuhtady and Alfaouri [28] included the demand and supply sides by optimizing solutions for reducing heating loads in residential buildings.

Table 5: Number and types of EEMs, and simulation tools

Ref	Number of EEMs	Simulation tools	Type of EEMs			
			Demand Side		Supply Side	Human Factor
			Building Envelope	Appliances		
[3]	9	DesignBuilder	●	●	N/A	●
[13]	3	DesignBuilder	●	N/A	N/A	●
[28]	4	Statistics (MATLAB)	●	●	●	
[29]	4	DesignBuilder	●	●	N/A	●
[30]	6	IDA ICE 4.8	●	●	N/A	●
[31]	9	Designbuilder	●	●	N/A	●
[32]	9	Designbuilder	●	●	N/A	●
[33]	1	PV*SOL 2021	N/A	N/A	●	N/A
[34]	11	DesignBuilder	●	N/A	N/A	●
[35]	11	DesignBuilder	●	N/A	N/A	●
[36]	11	DesignBuilder	●	N/A	N/A	●
[37]	2	DesignBuilder	●	●	N/A	N/A
[38]	5	IES-VE	●	N/A	N/A	N/A
[39]	4	TRNSYS	●	N/A	N/A	N/A

Software simulation tools. The software tools used in each of the 14 studies are illustrated in table 5. All the studies used BEM software for simulation, with 64.3% of the studies utilizing Designbuilder. Thus, it is noticeable that researchers are proficient and comfortable in using DesignBuilder. In addition, none of the studies used a BIM-based framework for the retrofitting analysis. However, in a recent study by Abu Qadourah et al. [30], the residential building model, which was developed in Sketchup, was then imported to the IDA ICE 4.8 simulation engine. Such a study can indicate the potential to include BIM-based frameworks in future research. As mentioned earlier in subsection 4.5, using BIM in energy retrofitting studies can have numerous advantages. Nevertheless, the lack of a comprehensive BIM-based framework limits its application.

Conclusion

This study reviewed the existing literature on energy retrofitting of residential buildings in Jordan. The keyword-based search disclosed 14 relevant studies that investigated optimization of residential

buildings energy performance using various EEMs. The analysis of this review illustrated that 93% of the studies were published in the past five years with only one study published in 2011. This indicates that energy retrofitting of existing residential buildings is a trending topic in Jordan, which is under development. The full reading of those selected papers and the information of worldwide review articles allowed to select four topics to critically analyse the studies on energy retrofitting of existing residential buildings in Jordan.

Furthermore, this review highlighted several research gaps in the existing literature in Jordan as follows:

- There is a lack of research that considers the three dimensions of sustainability, mainly the consideration of the social factors that influence and motivate the retrofitting of existing residential buildings.
- There is a lack of studies that apply pre-retrofitting M&V processes to calibrate the energy building models. Also, none of the studies applied the post-retrofitting M&V which might be needed to encourage and motivate owners to implement retrofitting programs.
- The literature review showed that, for the Jordanian case, studies do not include the three categories of EEMs which can decrease energy consumption of buildings.
- There is a lack of studies in Jordan that implement BIM-based frameworks which is an important emerging area to energy retrofitting of buildings.

Acknowledgement

This work was financially supported by: Base Funding - UIDB/04708/2020 of the CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - funded by national funds through the FCT/MCTES (PIDDAC).

Reference

- [1] A. Khasnis and M. Nettleman, *Global warming and infectious disease*, Archives of medical research, 36 (2005) 689-696.
- [2] G. Hwang and S. Tan, *Green building project management: obstacles and solutions for sustainable development*, Sustainable development, 20 (2012) 335-349.
- [3] K. Bataineh and A. Alrabee, *Improving the energy efficiency of the residential buildings in Jordan*, Buildings, 8 (2018) 85.
- [4] N. Komendantova, L. Marashdeh, L. Ekenberg, M. Danielson, F. Dettner, S. Hilpert, C. Wingenbach, K. Hassouneh and A. Al-Salaymeh, *Water–Energy nexus: addressing stakeholder preferences in Jordan*, Sustainability, 12 (2020) 6168.
- [5] Ministry of Water and Irrigation of Jordan, *Jordan water sector facts and figures*. Amman: Ministry of Water and Irrigation of Jordan, (2015). 2015-قطاع المياه_حقائق وارقام_.pdf (mwi.gov.jo), em 13/09/2022.
- [6] International Agency of Energy (IEA), *Key World Energy Statistics 2021*, retrived from: <https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2021/energy-efficiency>, (2021).
- [7] L. Shalalfeh, A. AlShalalfeh, K. Alkaradsheh, M. Alhamarneh and A. Bashaireh, *Electric Vehicles in Jordan: Challenges and Limitations*, Sustainability, 13 (2021) 3199.
- [8] R. Jagarajan, M. Asmoni, A. Mohammed, M. Jaafar, J. Mei and M. Baba, *Green retrofitting—A review of current status, implementations and challenges*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 67 (2017) 1360-1368.

- [9] R. Dar-Mousa and Z. Makhamreh, *Analysis of the pattern of energy consumptions and its impact on urban environmental sustainability in Jordan: Amman City as a case study*, Energy, Sustainability and Society, 9 (2019) 1-12.
- [10] W. Ahmed and M. Asif, *A critical review of energy retrofitting trends in residential buildings with particular focus on the GCC countries*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 144 (2021) 111000.
- [11] A. Hamid, K. Farsäter, A. Wahlström and P. Wallentén, *Literature review on renovation of multifamily buildings in temperate climate conditions*, Energy and Buildings, 172 (2018) 414-431.
- [12] Z. Ma, P. Cooper, D. Daly and L. Ledo, *Existing building retrofits: Methodology and state-of-the-art*, Energy and buildings, 55 (2012) 889-902.
- [13] A. Albatayneh, M. Assaf, M. Jaradat and D. Alterman, *The effectiveness of infiltration against roof insulation aimed at low income housing retrofits for different climate zones in Jordan*, Environmental and Climate Technologies, 24 (2020) 11-22.
- [14] G. Abu Rumman, A. Khdair and S. Khdair, *Current status and future investment potential in renewable energy in Jordan: An overview*, Heliyon, 6 (2020) e03346-e03346.
- [15] S. Al-Bajjali and A. Shamayleh, *Estimating the determinants of electricity consumption in Jordan*, Energy, 147 (2018) 1311-1320.
- [16] N. Hashempour, R. Taherkhani, M. Mahdikhani, *Energy performance optimization of existing buildings: a literature review*. Sustainable Cities and Society, 54 (2020) 101967.
- [17] Brundtland Commission, *Our common future: Report of the 1987 World Commission on Environment and Development*, Oxford University Press (1987).
- [18] B. Purvis, Y. Mao, and D. Robinson, *Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins*, Sustainability Science, 14 (2019) 681-695.
- [19] F. Edum-Fotwe and A. Price, *A social ontology for appraising sustainability of construction projects and developments*, International Journal of Project Management, 27 (2009) 313-322.
- [20] S. Hendiani, E. Sharifi, M. Bagherpour and S. Ghannadpour, *A multi-criteria sustainability assessment approach for energy systems using sustainability triple bottom line attributes and linguistic preferences*, Environment, Development and Sustainability, 22 (2019) 7771-7805.
- [21] World Green Buildings Council, *The business case for green buildings* (2013).
- [22] A. Synnefa, K. Vasilakopoulou, R. Masi, G. Kyriakodis, V. Londorfos, E. Mastrapostoli, T. Karlessi and M. Santamouris, *Transformation through renovation: An energy efficient retrofit of an apartment building in Athens*, Procedia Engineering, 180 (2017) 1003-1014.
- [23] N. Aldossary, Y. Rezgui and A. Kwan, *Domestic energy consumption patterns in a hot and arid climate: A multiple-case study analysis*, Renewable Energy, 62 (2014) 369-378.
- [24] E. Cagno, S. Franzò, E. Storoni and A. Trianni, *A characterisation framework of energy services offered by energy service companies*, Applied Energy, 324 (2022) 119674.
- [25] T. Gerrish, K. Ruikar, M. Cook, M. Johnson and M. Phillip, *Using BIM capabilities to improve existing building energy modelling practices*, Engineering, Construction and Architectural Management, 24 (2017) 190-208.
- [26] L. Sanhudo, N. Ramos, J. Martins, R. Almeida, E. Barreira, M. Simões and V. Cardoso, *Building information modeling for energy retrofitting—A review*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 89 (2018) 249-260.

- [27] W. Ahmed and M. Asif, *BIM-based techno-economic assessment of energy retrofitting residential buildings in hot humid climate*, Energy and Buildings, 227 (2020) 110406.
- [28] A. Almuhtady and M. Alfaouri, *Synergy of intelligent design and operation for sustainable residential heating systems, case study: Jordanian residential sector*, Sustainable Cities and Society, 55 (2020) 102034.
- [29] A. Bataineh and H. Ali, *Improving energy efficiency of multi-family apartment buildings case of Jordan*, International Journal of Energy Economics and Policy, 11 (2021) 244-254.
- [30] J. Abu Qadourah, A. Al-Falahat, S. Alrwashdeh and C. Nytsch-Geusen, *Improving the energy performance of the typical multi-family buildings in Amman Jordan*, City, Territory and Architecture, 9 (2022) 1-19.
- [31] K. Bataineh and A. Alrabee, *A cost effective approach to design of energy efficient residential buildings*, Frontiers of Architectural Research, 11 (2022) 297-307.
- [32] K. Bataineh and A. Alrabee, *Design optimization of energy efficient residential buildings in Mediterranean region*, Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, 10 (2022) 1090385.
- [33] S. Monna, R. Abdallah, A. Juaidi, A. Albatayneh, A. Zapata-Sierra and F. Manzano-Agugliaro, *Potential electricity production by installing photovoltaic systems on the rooftops of residential buildings in Jordan: An approach to climate change mitigation*, Energies, 15 (2022) 496.
- [34] A. Albatayneh, *Optimisation of building envelope parameters in a semi-arid and warm Mediterranean climate zone*, Energy Reports, 7 (2021) 2081-2093.
- [35] A. Albatayneh, *Optimising the parameters of a building envelope in the East Mediterranean Saharan, cool climate zone*, Buildings, 11 (2021) 43.
- [36] A. Albatayneh, T. Tayara, M. Jaradat, M. Al-Omary, M. Hindiye, D. Alterman and M. Ishbeytah, *Optimum building design variables in a warm Saharan Mediterranean climate zone*, International Journal of Photoenergy, 2021 (2021) 1-13.
- [37] A. Albatayneh, A. Juaidi, R. Abdallah and F. Manzano-Agugliaro, *Influence of the advancement in the LED lighting technologies on the optimum windows-to-wall ratio of Jordanians residential buildings*, Energies, 14 (2021) 5446.
- [38] S. Mabdeh, S. Ahmad, T. Alradaideh and A. Bataineh, *Low-cost ventilation strategies to improve the indoor environmental quality by enhancing the natural ventilation in multistory residential buildings*, Periodicals of Engineering and Natural Sciences, 8 (2020) 2045-2067.
- [39] S. Jaber and S. Ajib, *Optimum, technical and energy efficiency design of residential building in Mediterranean region*, Energy and Buildings, 43 (2011) 1829-1834.

Análise de normativas de incêndio em BIM por verificação automática de regras

ROTAVA Ramon^{1, a}, SILVA Rafael Fernandes^{2, b}, ROMAN Humberto^{3, c} e MARCHIORI Fernanda^{4, d}

¹Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (CBMSC), Rua Almirante Lamego, 381; Centro; Florianópolis/SC – Brasil; CEP 88015-600

²Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Civil, Rua João Pio Duarte da Silva, 205; Córrego Grande; Florianópolis/SC - Brasil; CEP 88040-900

³Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Civil, Rua João Pio Duarte da Silva, 205; Córrego Grande; Florianópolis/SC - Brasil; CEP 88040-900

⁴Universidade Federal de Santa Catarina - Departamento de Engenharia Civil, Rua João Pio Duarte da Silva, 205; Córrego Grande; Florianópolis/SC - Brasil; CEP 88040-900

^aramon_rotava@hotmail.com, ^bfernandes.silva@posgrad.ufsc.br, ^chumberto.roman@ufsc.br, ^dfernanda.marchiori@ufsc.br

Palavras-chave: BIM, Verificação automática de regras, Segurança Contra Incêndio, Extintores de incêndio, Solibri.

Resumo: As medidas de Segurança Contra Incêndio (SCI) são procedimentos aplicados em projetos de edificações com o intuito de prevenir situações de incêndio e proteger a vida humana. Uma importante medida de SCI é o sistema de extintores de incêndio. No Estado de Santa Catarina, os critérios de concepção e dimensionamento deste sistema estão estabelecidos na “Instrução Normativa 006 (IN 006): Sistema Preventivo por Extintores (SPE)”. Atualmente, o processo de análise dos Projetos Preventivos Contra Incêndio e Pânico (PPCI), é realizado manualmente pelos analistas do Corpo de Bombeiros que avaliam os documentos técnicos de projeto, sendo esse um processo moroso e burocrático. Uma solução possível destas problemáticas relacionadas a análises manuais dos PPCIs é a utilização de regras computacionais para verificar informações e suas relações sobre um modelo de informação da construção – BIM. Neste trabalho foram desenvolvidas regras computacionais para checagem de SPEs de acordo com a IN 006. As regras foram criadas no software Solibri Model Checker (SMC) e testadas em modelos protótipos para validação lógica das regras e em uma aplicação prática da verificação do SPE de um projeto real, ambos modelados no software ArchiCAD. Entre os resultados foram identificadas limitações do SMC e da própria IN 006 como parâmetros subjetivos.

Introdução

Os danos causados diretamente por um incêndio podem ser muito graves, como perdas de vidas e de patrimônio. Além de danos indiretos que também geram impactos econômicos e socioculturais, como interrupção de atividades das cadeias produtivas, gastos com reconstrução, desemprego, desalojamento de pessoas, entre outros [1]. Apenas no estado catarinense houve 7.042 ocorrências de incêndios registradas pelo Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (CBMSC) entre os anos 2015 e 2017 [2]. Isso tudo evidencia a importância do tema de Segurança Contra Incêndio (SCI) e de elaborar bons projetos de edificações que respeitem as medidas de SCI regulamentadas por normas técnicas.

No Estado de Santa Catarina, atualmente as considerações em relação à prevenção e proteção contra incêndio são aplicadas na fase de projeto das edificações através do Projeto Preventivo Contra Incêndio e Pânico (PPCI), que traz as especificações e critérios de dimensionamento de todos os sistemas e medidas de proteção contra incêndio e pânico de uma edificação. O PPCI é um

dos projetos que deve ser apresentado e aprovado para a liberação do início da obra, e também é levado em conta nas vistorias necessárias para obtenção dos alvarás de habitação e funcionamento do imóvel [3]. Dentre estas medidas, o sistema de extintor de incêndio é importante, já que é responsável pela extinção primária do princípio de incêndio, evitando que o mesmo se propague [4]. Para projetos de edificações localizadas em Santa Catarina, os critérios de concepção e dimensionamento deste sistema estão estabelecidos na “Instrução Normativa 006 (IN 006): Sistema Preventivo por Extintores (SPE)”.

Apesar da importância da Indústria da Construção Civil (ICC) no Brasil, o setor é baseado em métodos tradicionais e pouco tecnológicos. E, para se conseguir atingir níveis melhores de produtividade e qualidade, vê-se a necessidade de maior inovação e mudanças [5, 6]. Em relação a isso, pode-se destacar um padrão atrasado no uso da Tecnologia da Informação e Comunicação (TIC), que é mais agravado devido à característica das atividades da ICC serem baseadas em processos que geram um grande volume de informações [7], fato que determina um grande potencial do uso da TIC neste setor.

A Modelagem de Informação da Construção, ou *Building Modeling Information* (BIM) aparece como uma grande oportunidade de melhoria do projeto de Arquitetura, Engenharia e Construção Civil (AEC). Uma das diversas facilidades possibilitadas pelo BIM é a verificação automática por regras, que permite a checagem dos elementos, assim como suas propriedades e relações, de um modelo de uma edificação através de um modo mais automatizado [8]. Por meio dessas checagens, diversos requisitos e especificações de um projeto podem ser analisados, como interferências entre disciplinas, identificação de deficiências do projeto e atendimentos a normas técnicas. Inclusive, alguns países, como a Cingapura, já implementaram sistemas baseados em verificação automática de regras para checagem da conformidade de projetos de acordo com as normas reguladoras [9]. Estas regras, que são criadas computacionalmente por meio de softwares e ferramentas de programação, podem verificar os modelos em um formato público e interoperável, o *Industry Foundation Classes* (IFC).

A respeito da segurança contra incêndio, as exigências de projeto impostas nesta área são majoritariamente regulamentadas por normas prescritivas, e que tem um grande potencial de serem analisadas através de checagem por regras computacionais. Apesar disso, as atividades relacionadas à análise das exigências de SCI, principalmente pelos órgãos públicos, dos projetos são feitas de uma forma mais manual, resultando em um processo moroso e burocrático.

Os benefícios acarretados da aplicação deste recurso são a minimização dos erros e do tempo atrelado à análise dos projetos, além de facilitar a colaboração entre os agentes envolvidos nos processos da construção de uma edificação [10]. Desta forma, aplicando a verificação automática de regras na análise de PPCIs, a redução de erros tem grande relevância, já que as considerações de SCI presentes neste tipo de projeto tem como objetivo a proteção da vida humana, do patrimônio e a continuidade do processo produtivo da sociedade.

E em relação ao aumento de velocidade no processo, os esforços que forem poupados no processo de análise de PPCIs podem ser redirecionados para outras demandas da sociedade. Além disso, a demora na aprovação dos projetos é encarada como um grande gargalo da ICC, já que, enquanto se aguarda muito pela aprovação dos projetos, o setor deixa de produzir, ficando com investimentos parados, empregos adiados e impostos deixados de ser recolhidos, impactando na sociedade e na economia do país, enfatizando a importância de reduzir o tempo de aprovação de projetos [11].

Diante disso, o objetivo deste trabalho é analisar, por meio de verificação automática de regras, as especificações dos Sistemas Preventivos por Extintores (SPE) em modelos BIM, sob os aspectos regulamentadores da Instrução Normativa 006 (Sistema Preventivo por Extintores) do Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina (CBMSC).

Pelo fato do trabalho se limitar à criação de regras automáticas para verificar o atendimento de projetos de edificações apenas em relação ao sistema de extintores de incêndio, e apenas com a utilização do software Solibri Model Checker (SMC), parte do trabalho enfoca em descobrir

limitações tanto do software quanto da norma técnica utilizada (IN 006) relacionadas à finalidade da pesquisa. Por fim, as regras criadas serão testadas em um projeto em BIM real.

BIM e verificação automática de regras aplicados à Segurança Contra Incêndio

Um importante conceito relacionado ao tema de verificação automática de regras é a interoperabilidade, que, no âmbito do BIM representa a “habilidade de ferramentas BIM de diferentes desenvolvedores de trocar dados do modelo de construção e operar sobre esses dados. Interoperabilidade é um requisito importante para a colaboração de equipes” [12].

Neste contexto, é necessário que haja um protocolo padrão para trocas de dados, e que este protocolo esteja implementado, para que seja possível uma boa interoperabilidade [13]. E atualmente, na esfera do BIM, este protocolo padrão é assegurado por um modelo neutro de dados chamado Industry Foundation Classes (IFC), que é definido como um esquema de dados comuns que torna possível manter e trocar dados relevantes entre diferentes softwares [14].

O software Solibri Model Checker (SMC) tem como principal proposta analisar modelos BIM em relação à integridade, qualidade e segurança física, revelando as potenciais falhas e fraquezas do projeto, enaltecendo os conflitos entre componentes e checando se a edificação cumpre requisitos normativos. Esta análise é feita através de regras computacionais personalizáveis, que consideram diversos parâmetros dos componentes do modelo da edificação, além da geometria e forma [15].

Como o SMC foi desenvolvido desde o seu princípio para trabalhar com arquivos no formato IFC, pode-se dizer que a ferramenta está de acordo com a filosofia de interoperabilidade do OpenBIM, proposta pela buildingSMART [16].

Existe um grande potencial na verificação automática de regras para checar se determinados requisitos, por exemplo exigências normativas, estão sendo atendidos em um modelo de uma edificação. Os principais interessados no desenvolvimento desta área são órgãos de cumprimento de código, organizações e clientes envolvidos com projetos de edificações que devem atender exigências normativas ou não como de segurança, integridade estrutural, consumo de energia, entre outros [12].

Kater e Ruschel [10] mostraram que existe receptividade por parte de profissionais envolvidos na aprovação de PPCI quanto a verificação automática de regras. Identificaram, ainda, que o despreparo e o desconhecimento podem ser empecilhos para o desenvolvimento da prática, já que poucos conheciam a fundo sobre o BIM, e nenhum deles sabia a respeito de verificação automática de regras.

Além disso, outros dois estudos sugerem que este tema de verificação automática de regras está de fato sendo aplicado à SCI, pelo menos na esfera acadêmica. Em um deles [17], foi elaborado um artefato baseado em verificação automática de regras para checagem de projetos de prevenção contra incêndio de acordo com as normas reguladoras do Estado do Paraná. O outro [18], objetiva a avaliação do tema em questão aplicado aos requisitos de saídas de emergência das normas de segurança contra incêndio do Corpo de Bombeiros Militar do Estado da Bahia.

Método de pesquisa

Para alcançar o objetivo proposto, este trabalho foi desenvolvido através das etapas da Figura 1:

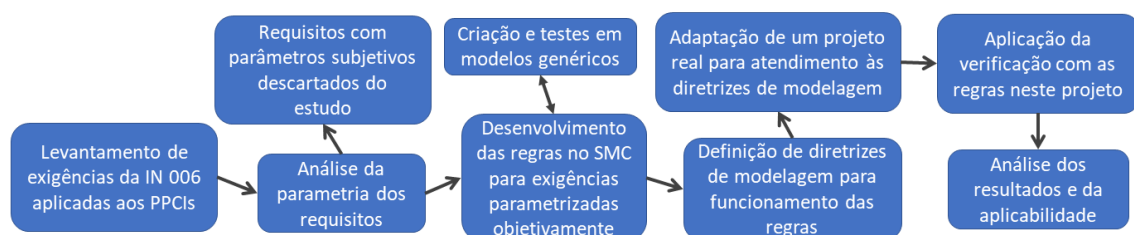


Figura 1: Fluxograma das etapas da pesquisa

Requisitos normativos aplicáveis à verificação automática de regras

No Quadro 1 têm-se os artigos da IN 006 que podem ser divididos em exigências (já que pode haver mais de uma exigência em um mesmo artigo) sendo desconsiderados aqueles que continham informações administrativas e processuais, de direcionamento aos fabricantes, dentre outros. Nas colunas tem-se: número do artigo; resumo da(s) exigência(s) do artigo; se a exigência está parametrizada subjetivamente ou objetivamente; se foi possível ou não verificar a exigência através do SMC, ou seja, uma informação que indica uma limitação do software; e por fim, os modelos de regra utilizados para a verificação das exigências que foram possíveis de serem feitas.

Quadro 1: Análise da aplicabilidade dos artigos da IN 006

Nº	Exigência	Parametrização	Verificação possível	Modelos de regra
5	Extintores devem ter cor vermelha.	Objetiva	Sim	SOL 230
6	Agente extintor deve ser selecionado de acordo com a classe de incêndio a ser protegida.	Subjetiva	-	-
	Instalação de extintores para fogo tipo C próximo a algumas instalações.	Subjetiva	-	-
7	Distância de caminhamento máxima até os extintores portáteis.	Objetiva	Sim	<i>Information Takeoff</i>
8	Quantidade mínima de extintores por pavimento.	Objetiva	Sim	SOL 231
9	Instalação de extintores específicos em postos de reabastecimento de combustíveis.	Objetiva	Não	-
10	Obrigatoriedade de proteção por extintores sobre rodas em alguns casos.	Objetiva	Sim	SOL 231 e SOL 11
11	Distância de caminhamento máxima até os extintores sobre rodas.	Objetiva	Sim	<i>Information Takeoff</i>
13	Extintores sobre rodas devem acessar qualquer parte da área a ser protegida, sem impedimentos.	Objetiva	Não	-
15	Extintores devem estar localizados em circulação e em área comum.	Objetiva	Sim	SOL 1
	Localização de extintores onde a probabilidade do fogo bloquear o acesso seja a menor possível.	Subjetiva	-	-
	Extintores devem estar localizados onde possuir boa visibilidade e acesso desimpedido.	Subjetiva	-	-
16	Proibido o depósito de materiais abaixo ou acima dos extintores.	Objetiva	Sim	SOL 222
	Proibido a instalação de extintores em escadas, rampas, antecâmaras e em seus patamares.	Objetiva	Sim	SOL 1
17	Altura máxima de extintores portáteis.	Objetiva	Sim	SOL 222
	Suporte adequado para extintores localizados no piso.	Subjetiva	-	-
18	Sinalização de extintor portátil em parede.	Objetiva	Não	-
19	Sinalização de extintor portátil em coluna.	Objetiva	Não	-
20	Sinalização de extintor portátil em casos específicos.	Objetiva	Não	-

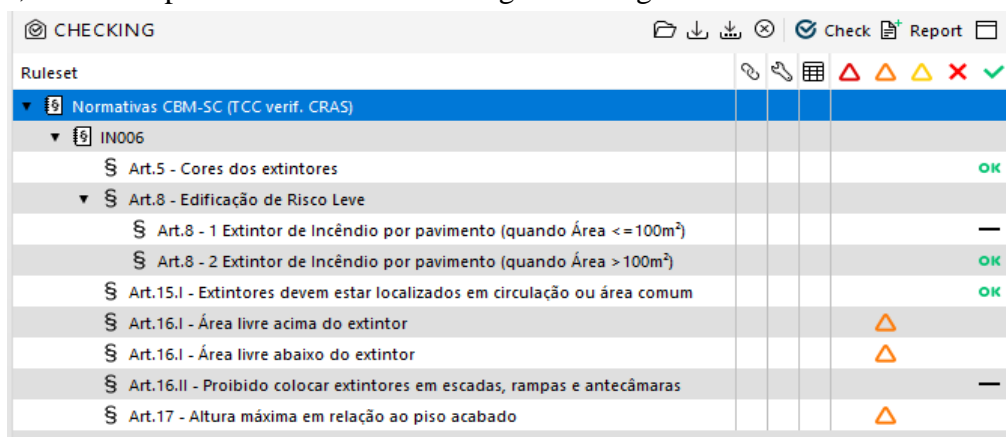
Das 19 exigências aplicáveis em projeto da IN 006 em análise: 14 são parametrizadas objetivamente, e as outras cinco são parametrizadas subjetivamente; nove puderam ser verificadas pelo software de checagem, enquanto que para as outras 10 não foi possível realizar a verificação. Destas 10, cinco tiveram a impossibilidade de verificação motivada por limitações do software SMC, e cinco tiveram a parametrização subjetiva na IN como motivo. Para o desenvolvimento das regras de checagem foram utilizados os modelos de regras do SMC SOL 230 para uma exigência, SOL 231 para duas exigências, SOL 1 para duas exigências, SOL 222 para duas exigências e SOL 11 para uma exigência. Além disso, a verificação de duas exigências não pôde ser feita por verificação de regras, mas sim através da funcionalidade “Information Takeoff”, que quer dizer “Extração de informações”, do software de checagem Solibri.

Aplicação prática das regras em um projeto em BIM real

Modelo de edificação utilizado. O modelo BIM utilizado foi o as-built de uma unidade do Centro de Referência de Assistência Social (CRAS) da Grande Florianópolis, que foi elaborado no software ArchiCAD, sendo um edifício térreo, com estrutura de concreto armado e paredes de vedação de bloco cerâmico.

Para a realização das verificações, foram feitas mudanças no modelo relacionadas às diretrizes de modelagem (essenciais ao funcionamento correto das checagens por regra), quais sejam: atribuir os códigos de classificação através de property set de alguns componentes como extintores de incêndio, espaços de circulação ou área comum e cores dos elementos; adicionar a ocupação do imóvel na propriedade “OccupancyType” do conjunto de propriedades “Pset_BuildingCommon”; criar as vigas que representam as rotas de caminhamento até os extintores de incêndio; criar um espaço que represente a área bruta da edificação; atribuir as características de agente extintor e capacidade extintora dos extintores portáteis, através de *property set*.

Resultados das verificações. O modelo foi aberto no SMC, assim como o ruleset criado com todas as regras desenvolvidas, e, após a checagem destas regras, foram encontradas algumas ocorrências, conforme pode ser visualizado na Figura 2 a seguir.



Ruleset	Check	Report
Normativas CBM-SC (TCC verif. CRAS)		
IN006		
§ Art.5 - Cores dos extintores		OK
§ Art.8 - Edificação de Risco Leve		
§ Art.8 - 1 Extintor de Incêndio por pavimento (quando Área <= 100m²)		—
§ Art.8 - 2 Extintor de Incêndio por pavimento (quando Área > 100m²)		OK
§ Art.15.I - Extintores devem estar localizados em circulação ou área comum		OK
§ Art.16.I - Área livre acima do extintor		△
§ Art.16.I - Área livre abaixo do extintor		△
§ Art.16.II - Proibido colocar extintores em escadas, rampas e antecâmaras		—
§ Art.17 - Altura máxima em relação ao piso acabado		△

Figura 2: Ciclos de Pesquisa-ação desenvolvidos

O projeto está de acordo com as exigências dos Artigos 5º, 8º e 15º.I, indicados pelo símbolo de OK, sendo o resultado que era esperado.

Para os artigos 8º e item II do artigo 16º o símbolo “—” indica que o modelo não contém alguns componentes envolvidos na regra. Este resultado também era esperado, já que, no caso do Artigo 8º, a regra com este resultado se aplica para pavimentos com área maior que 100m², e o projeto em questão possui um único pavimento com área menor que este valor. Já para o item II do artigo 16º, que checa se extintores estão localizados indevidamente em área de escada, rampa e antecâmara, o resultado obtido se deve ao fato de que a edificação não possui escadas, rampas e antecâmaras em seu interior, já que se trata de um bloco térreo, e o componente faltante é algum espaço (IfcSpace) que represente área de escada, antecâmara ou rampa.

Para a verificação do item I do Artigo 16º, que trata de duas regras, não se esperava a indicação de inconformidade. Mas após verificar os resultados, constatou-se que as três ocorrências de inconformidade ocorreram por falha na configuração da regra, já que os elementos acusados de estarem acima ou abaixo de extintores, o que é proibido pela norma, na verdade se tratava de uma viga, que está modelada como “IfcBuildingParts”, e dois rodapés, que estavam modelados como paredes. Então, após isto, as regras foram readequadas para incluir estes tipos de elementos como elementos de exceção.

A outra ocorrência de conflito, na verificação do Artigo 17º, que define a altura máxima que o extintor deve ter em relação ao piso acabado, de fato indica uma inconformidade real do projeto, já que existem dois extintores posicionados a uma altura maior do que a máxima definida.

Diferentemente das regras de checagem executadas, foi utilizada a funcionalidade de extração de informações do SMC para verificar a exigência do Artigo 7º, que determina as distâncias máximas que podem ser percorridas na edificação até alcançar um extintor portátil. Isto ocorreu devido a uma

limitação do software, já que não era possível checar o artigo através de nenhum dos modelos de regras. Por ser um artigo é muito importante para o dimensionamento do sistema de extintores, optou-se por criar um meio para a verificação do mesmo. E esta maneira foi modelar elementos, que no caso foram vigas, que representassem as rotas de caminhamentos até os extintores. Utilizando a funcionalidade de extração de informações, ou Information Takeoff, do software, foi possível então verificar que a soma do comprimento das vigas não extrapolava o máximo permitido de 30m, para imóveis de risco de incêndio leve.

Considerações finais

O objetivo da pesquisa não foi totalmente alcançado, devido às limitações do software de checagem utilizado no estudo, o Solibri Model Checker, e da Instrução Normativa 006 que regulamenta as exigências projetuais de sistemas de extintores de incêndio no estado de Santa Catarina. Apenas 47% das exigências normativas delimitadas pelo estudo foram checadas com sucesso. Apesar de ter sido menos da metade, pode-se considerar os resultados como satisfatórios, já que esta baixa taxa se justifica pelas limitações já citadas, em relação ao software e a norma técnica utilizadas. Também podemos afirmar que é uma questão de tempo para o surgimento de alguma solução tecnológica mais direcionada, ou o aperfeiçoamento daquele usado neste estudo. Bem como a readequação das normas.

Em relação a compreensão dos limites do SMC, o objetivo foi descobrir todas as possibilidades e limitações que esta ferramenta apresenta – para que depois disso possam ser propostas melhorias ao desenvolvedor do software e/ou buscar outra ferramenta para a mesma finalidade. Contudo, pode-se afirmar que o software em questão é limitado para o uso que o estudo propõe, já que o mesmo é baseado em modelos de regras preexistentes, porém com um bom potencial, já que grande parte das verificações foram possíveis de serem feitas, o que evidencia o potencial da verificação automática de regras no geral.

Já a identificação das limitações da norma – relacionadas à subjetividade dos parâmetros de algumas exigências – permitiu constatar que a mesma deverá ser adaptada para que a verificação automática por regras possa ser aplicada de fato pelos agentes envolvidos na elaboração e análise de projetos de sistemas de SCI.

Em relação a problemática da demora na aprovação de projetos, que este trabalho se propôs a encontrar uma solução, acredita-se que provavelmente o tempo de análise seria reduzido consideravelmente com a utilização de verificação automática de regras na análise de PPCIs. Porém, é necessário a comprovação experimental para esta afirmação.

Concluiu-se também a importância do IFC para este tema, já que este formato de dados permite a utilização de diferentes softwares de modelagem para a elaboração dos projetos a serem checados. Porém, foi percebido que o IFC deve ser melhor explorado para o que esse estudo se propôs, já que várias características atribuídas aos elementos através dos softwares modeladores não são facilmente mantidas no modelo em formato IFC. Logo, pode-se aferir esta questão como uma limitação do IFC e da forma como os softwares se relacionam com este tipo de formato.

Referências

- [1] C. Corrêa, J. J. Rêgo Silva, T. A. Pires and G. C. Braga, *Mapeamento de incêndios em edificações: um estudo de caso na cidade do Recife*, Revista de Engenharia Civil IMED, 2 (3) (2015) 15-34.
- [2] R. V. Miguel, *Análise da ocorrência de incêndios entre 2015 e 2017 na cidade de Criciúma – SC*. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Unesc, Criciúma (2018).
- [3] Corpo de Bombeiros Militar de Santa Catarina, *Instrução Normativa 001: Da Atividade Técnica*. Florianópolis, SC (2015).

- [4] R. Ono, *Parâmetros para garantia da qualidade do projeto de segurança contra incêndio em edifícios altos*, *Ambiente Construído*, 7(1) (2007) 97-113.
- [5] W. S. Catelani, E. T. Santos, *Normas brasileiras sobre BIM*, *Concreto & Construções*, (2016) 54-59.
- [6] K. Kincelova, C. Botton, P. Blanchet, C. Dagenais, *Fire Safety in Tall Timber Building: A BIM-Based Automated Code-Checking Approach*, *Buildings*, 10 (7) (2020) 121.
- [7] S. Hire, K. Ruikar, S. Sandbhor, *A critical review on BIM for construction safety management*, Loughborough University (2021).
- [8] C. Eastman, J. M. Lee, Y. S. Jeong, J. K. Lee, *Automatic rule-based checking of building designs*, *Automation in Construction*, 18 (8) (2009) 1011– 1033.
- [9] J. Choi, J. Choi, I. Kim, *Development of BIM-based evacuation regulation checking system for high-rise and complex buildings*, *Automation In Construction*, 46 (2014) 38-49.
- [10] M. Kater, R. Ruschel, *Avaliando a aplicabilidade de BIM para a verificação da norma de segurança contra incêndio em projeto de habitação multifamiliar*, XV Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, (2014) 2821-2831.
- [11] N. Sarquis, *A dificuldade para aprovação de projetos*, <https://cbic.org.br/a-dificuldade-para-aprovacao-de-projetos/> (2018), em: 15/08/2022.
- [12] C. Eastman et al. *Manual De Bim: Um Guia De Modelagem Da Informação Da Construção Para Arquitetos, Engenheiros, Gerentes, Construtores e Incorporadores*, Bookman, Porto Alegre, RS (2014).
- [13] M. L. V. X. Andrade, R. Ruschel, *Interoperabilidade de aplicativos BIM usados em arquitetura por meio do formato IFC*, *Gestão & Tecnologia de Projetos*, 2 (4) (2009), 76-111.
- [14] Buildingsmart. *IFC Introduction*, <https://www.buildingsmart.org/standards/bsi-standards/industry-foundation-classes/>, em 15/08/2022.
- [15] Solibri. *Solibri Model Checker V9.5: Getting Started with Solibri Model Checker™* (2014).
- [16] L. Khemlani, *Solibri Model Checker: AECbytes Review* (2018).
- [17] F. W. França, *Método para verificação automática de regras utilizando BIM aplicado ao código de segurança contra incêndio e pânico do Paraná (CSCIP-PR)*. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná, Universidade Federal do Paraná, Curitiba (2018).
- [18] A. S. Barbosa, *Verificação automática de requisitos de projeto de saídas de emergência com uso de Building Information Modeling (BIM) e programação visual computacional*. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador (2019).

Análise da otimização do desempenho energético na reabilitação: O caso de um edifício em granito, em Pinhel

MENDO Vera^{1,a}, POGGI Francesca^{2,b} e PINHO Fernando F.S.^{3,c}

¹Departamento de Engenharia Civil, NOVA School of Science and Technology | FCT NOVA 2829-516 Caparica, Portugal

²CICS.NOVA - Centro Interdisciplinar de Ciências Sociais, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa, Avenida de Berna, 26-C, 1069-061, Lisboa, Portugal

³CERIS; Departamento de Engenharia Civil, NOVA School of Science and Technology | FCT NOVA, 2829-516 Caparica, Portugal

^av.mendo@campus.fct.unl.pt, ^bf.poggi@fcsh.unl.pt, ^cffp@fct.unl.pt

Palavras-chave: Edifícios em Granito, Análise Bioclimática, Eficiência Energética, BIM, Simulações Dinâmicas

Resumo. A reabilitação de edifícios, sendo um importante processo para a preservação do património edificado existente, apresenta um desafio no que diz respeito à integração da eficiência energética, em particular no caso da arquitetura tradicional. O trabalho desenvolvido tem por base o estudo do contexto bioclimático e a sua relação com possíveis soluções de melhoria do desempenho energético a aplicar num edifício de construção tradicional, com estrutura de granito. Adotando o método ao estudo deste edifício, localizado no concelho de Pinhel, distrito da Guarda, foi realizada uma análise relativa ao reforço da eficiência energética, baseada numa abordagem BIM (Building Information Modelling), utilizando o software Revit e o plugin Insight. O trabalho analisa diferentes soluções nos domínios do conforto térmico interior, produção de energia solar e redução global dos consumos de energia. Neste sentido, a análise desenvolvida assenta na comparação das simulações energéticas desenvolvidas para o edifício existente e o proposto, após este ser alvo de medidas de otimização integradas na sua futura reabilitação. Os resultados demonstram o potencial de aplicação da metodologia BIM na otimização de projetos de reabilitação energética, ao informar os projetistas sobre as diferentes soluções e respetivas melhorias, ou não, que podem ser implementadas na fase de conceção. Conclui-se, assim, que a utilização das ferramentas de simulação com base na parametrização dos projetos representa um contributo substancial na melhoria do desempenho energético dos edifícios, e pode também proporcionar resultados positivos no processo de reabilitação.

Introdução

A reabilitação de edifícios antigos desempenha um papel de grande relevância na requalificação dos núcleos urbanos, onde cada vez mais se levantam desafios relacionados com a necessidade de se promover o modelo de cidade compacta, através da priorização da verticalização da cidade de forma a utilizar ao máximo o recurso do solo.

A necessidade de renovação e melhoramento das infraestruturas existentes nas cidades e a consequente necessidade de reabilitação de edifícios antigos, está atualmente relacionada com o esgotamento de recursos naturais e o peso dos consumos de energia no setor da construção, problemáticas que conduzem à necessidade da adoção de medidas de melhoria do desempenho energético das habitações, e consequente mitigação das alterações climáticas.

Desde sempre o Homem sentiu a necessidade de procurar por abrigos que garantissem as melhores condições de segurança contra os fatores externos [3]. Através do conhecimento intrínseco do ser humano, e a observação do espaço que o rodeia, a construção do abrigo começou por ser feita de uma forma intuitiva, procurando locais abrigados dos elementos da natureza, como chuva e vento. O conceito mitológico de *Genius Loci*, relaciona a importância da relação entre o

ambiente natural e o ambiente construído no projeto de edifícios e no seu desempenho térmico [4], pois este tem em conta as características inerentes de um local, como a sua geografia, o seu clima e a cultura onde se insere.

As técnicas de construção vernaculares que foram sendo desenvolvidas por todo o planeta Terra, foram evoluindo ao longo dos tempos de forma a responder às diferentes condicionantes climáticas e, conseqüentemente, a proporcionar melhores condições de conforto térmico [3]. Na ausência de soluções tecnológicas avançadas, e com o objetivo de reduzir o desconforto térmico, os edifícios vernaculares eram construídos com estratégias passivas, tendo como base características geográficas como a insolação, a orientação, a topografia, a forma do edifício, os materiais utilizados, entre outros [4]. Assim, podemos dizer que a arquitetura vernacular era pensada de forma holística, considerando o entendimento do todo como parte integrante da construção do edifício, relacionando o lugar, o material, a forma e o clima como bases para a sua sustentabilidade.

Entre as principais condições para a reabilitação eficiente de um edifício, pode referir-se: a recuperação e o retorno da utilidade do edifício, a adoção de medidas que tenham em conta a poupança de energia e a utilização de pedra local como material de construção [12], sendo que, tanto os materiais utilizados como quaisquer adoções efetuadas devem estar em harmonia com a estrutura original do edifício, não devendo qualquer intervenção prejudicar a qualidade e integridade do próprio edifício.

Todas as figuras não referenciadas ao longo do artigo foram elaboradas pela autora.

Enquadramento / Pesquisa Bibliográfica

A melhoria do desempenho energético de edifícios vem sendo vinculado às intervenções de reabilitação, uma vez que nestas se pretende conferir características funcionais de desempenho e segurança estrutural e construtiva. Este vínculo tem sido reforçado em Portugal nos últimos anos, com a publicação de vários documentos que constituem um enquadramento legal a estas questões.

O Decreto-Lei 101-D/2020 de 7 de dezembro, na sua versão mais recente Decreto-Lei 102/2021 de 19 de novembro, que estabelece os requisitos aplicáveis à conceção e renovação de edifícios, tem como objetivo assegurar a melhoria do desempenho energético destes através do estabelecimento de requisitos aplicáveis à sua modernização e renovação, e regulamenta o sistema de certificação energética dos edifícios (SCE). Este Decreto-Lei transpõe a Diretiva (UE) 2018/844 e parcialmente a Diretiva (UE) 2019/944 e a Diretiva (UE) 2018/2001, e procede à terceira alteração do Decreto-Lei n.º 56/2012 de 12 de março e à segunda alteração do Decreto-Lei n.º 68-A/2015 de 30 de abril.

A partir da entrada em vigor deste Decreto-Lei, passou a ser solicitada junto da entrega do projeto de arquitetura nas Câmaras Municipais, um plano que demonstre o cumprimento do comportamento térmico, quer seja com pormenores em peças desenhadas, quer seja através de cálculos (n.º5 do artigo 6º). Esta medida faz com que o projeto térmico passe a ser pensado ao mesmo tempo que o projeto de arquitetura, de forma a que o arquiteto tenha um papel mais ativo na procura de soluções de eficiência energética durante a conceção do edifício.

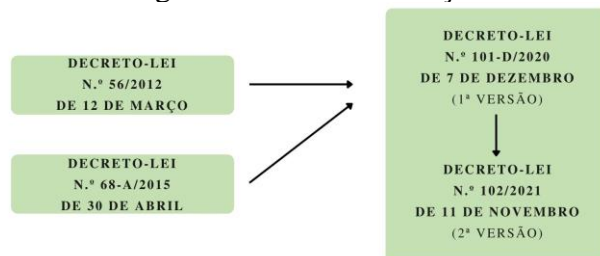


Figura 1: Enquadramento esquemático do enquadramento do Decreto-Lei 101-D/2020

Outros documentos, com certa relevância no enquadramento legal, relacionado com o tema em estudo neste trabalho, têm sido publicados, tais como os indicados na figura 2.



Figura 2: Enquadramento esquemático da legislação em vigor

O tema da reabilitação de edifícios vernaculares pode ser tratado numa perspetiva de reforço da eficiência energética e promoção de energias renováveis. Sendo a poupança de energia dos edifícios existentes e as medidas de eficiência energética principais temas de pesquisa em todo o mundo [10], torna-se evidente o impacto que estas preocupações com a conceção do projeto têm vindo a alcançar. Preocupações estas que surgem principalmente por fatores económicos, uma vez que o aquecimento, o arrefecimento e a iluminação artificial são as principais fontes de uso de energia em edifícios habitacionais [5].

Jaber, S. & Ajib, S. (2010) demonstraram que a preocupação com a aplicação de medidas de eficiência energética na fase de projeto do edifício pode proporcionar um melhor conforto térmico aos ocupantes por custos baixos, sendo possível reduzir cerca de 27,59% do consumo anual da energia utilizada, através de uma boa orientação do edifício, uma dimensão dos vãos exteriores adequada, o uso de palas de proteção na estação quente, e o isolamento adequado das paredes e cobertura.

Com o objetivo de melhorar o desempenho energético de uma habitação rural na região de Chlef, na Argélia, Missoum, M. et al (2014:387) comprova que a integração de medidas passivas de eficiência energética (orientação da casa, implementação de isolamento térmico adequado e dimensão adequada dos vãos exteriores) permitiu uma redução de 63,5% das necessidades energéticas mantendo um mínimo de conforto no edifício. Comprova ainda que a implementação de medidas ativas (a utilização do sistema fotovoltaico, que permitiu a produção de energia elétrica para alimentação de eletrodomésticos e iluminação artificial), contribui com 72% do consumo anual de energia, devido ao grande potencial solar da região.

No contexto de técnicas passivas que permitem um bom desempenho térmico, é importante analisar os edifícios vernáculos, sendo que diversos estudos realizados em diferentes partes do mundo, mostraram que, este tipo de edifícios, que utiliza apenas estratégias passivas, atinge níveis de conforto térmico aceitáveis ao longo da maior parte do ano. Em alguns desses estudos, ainda que várias das soluções de construção adotadas não atendessem alguns dos requisitos de regulamentação térmica atuais, foi comprovado que os edifícios vernaculares tinham uma melhor eficiência energética do que edifícios contemporâneos [4]. Esta conclusão similar em diferentes estudos deve-se à utilização de materiais locais que providenciam conforto térmico, à forma dos edifícios que permite assegurar a melhor orientação solar e às técnicas construtivas adaptadas ao ambiente e à cultura local, sendo que nos últimos anos tem surgido cada vez mais estudos que relacionam a arquitetura vernacular ao desempenho energético, especialmente tendo em consideração tipos de casas e materiais rurais [9].

As construções em alvenaria de pedra tradicional apresentam diversos padrões construtivos e irregularidades, variando de acordo com as técnicas construtivas utilizadas em diferentes épocas e em cada país, a disponibilidade, custo e transporte dos materiais. A pedra passa por um método simples de processamento do seu estado cru até à sua aplicação como material de construção, precisando de muito pouca manutenção para poder ser utilizada na construção de edifícios (Sekularac, N. et al, 2019: 2), razão pela qual foi tão utilizada em edifícios vernaculares.

O granito em particular, pode ser agrupado em dois grupos principais: granitos biotíticos pós-tectónicos e granitos mais antigos de duas micas [11]. Sousa, L. et al (2005:155) apresentam um estudo com resultados da análise à composição dos granitos mais comuns em Portugal, sendo que estes são compostos por quartzo, feldspato potássico, plagioclásio, biotita, muscovita e apatita, variando a percentagem de cada componente de acordo com o granito em análise. O granito da região de Pinhel, onde se localiza o caso de estudo deste trabalho, é o granito cinza. Sendo a região de Pinhel de solo granítico, e o edifício do caso de estudo com estrutura em granito, existe uma possibilidade de se verificar a presença de radão no edifício, pois este gás radioativo que existe na natureza resulta da desintegração do urânio das formações graníticas. Este representa cerca de 40% da radiação a que o Homem está exposto [8], sendo que, para reduzir os efeitos do radão algumas medidas que se podem colocar em prática passam por promover a ventilação do edifício, evitar o isolamento total dos vãos exteriores, colmatar fissuras que possam existir no pavimento térreo ou em paredes de granito e fazer uma monitorização periódica [2].

A melhoria do desempenho energético em reabilitações pode ser facilmente quantificada através de ferramentas que atualmente temos à disposição na fase de conceção do projeto. O BIM (*Building Information Modeling*) é uma metodologia que pode transformar a forma como os edifícios são concebidos, projetados, construídos e mantidos, uma vez que, o modelo BIM condensa em apenas um ficheiro todas as informações relativas ao projeto, permitindo uma integração entre as várias fases e as várias especialidades de um projeto, diminuindo as eventuais incompatibilidades entre si. Pode ser uma ferramenta importante na conceção de projetos mais sustentáveis uma vez que permite, entre outros, fazer uma análise comparativa entre diferentes materiais e soluções construtivas ainda na fase de conceção do projeto, avaliar o conforto térmico interior a partir do modelo, estimar a necessidade energética do edifício ou auxiliar nos processos de certificação energética [7].

Metodologia

A metodologia utilizada neste trabalho para obtenção dos resultados passou pelas quatro fases indicadas na figura 3:

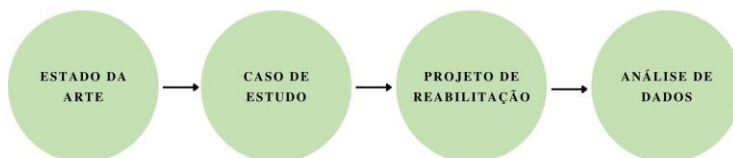


Figura 3: Enquadramento esquemático da metodologia aplicada

Numa fase preliminar, foi feita uma pesquisa bibliográfica do estado da arte, sintetizando as bases e conceitos que suportam o estudo da eficiência energética na reabilitação, com foco em edifícios em pedra, assim como um enquadramento legal da legislação em vigor. Seguiu-se o estudo de um caso pertinente para a temática do trabalho, com aplicação prática, para o qual foi desenvolvido um projeto de reabilitação complementado por BIM. Foi utilizado o Revit como programa BIM para a modelação do edifício existente e da solução arquitetónica, em integração com o plugin Insight como sistema de simulação para uma correta análise energética do edifício. Por fim, foi feita uma análise dos dados obtidos no estudo.

Caso de estudo

Descrição. O edifício em estudo neste trabalho localiza-se na rua 1 de maio na cidade de Pinhel, distrito da Guarda, com a cota de soleira do piso 0 a 646,48 metros do nível médio das águas do mar.



Figura 4: A. Localização da cidade de Pinhel, B. Implantação do edifício (Google Maps)

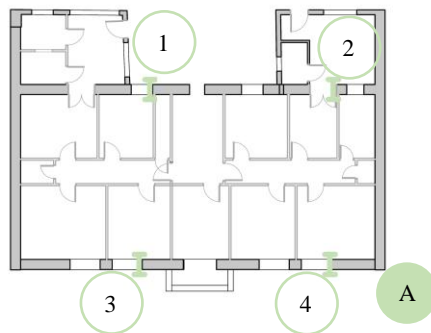
No piso 1, encontram-se duas unidades habitacionais, com acesso a um logradouro, e no piso 0, à cota da rua, existem 2 espaços que foram utilizados na sua maioria do tempo por lojas privadas, sendo que a loja de maior dimensão foi utilizada durante algum tempo como discoteca. As unidades habitacionais do nível superior encontram-se inabitadas há cerca de 25 anos, e as lojas inutilizadas há cerca de 15 anos.



Figura 5: A. Fachada principal, B. Logradouro

Como se pode verificar na figura 5-B, no logradouro existem atualmente uns anexos que foram construídos de forma ilegal, sem licenciamento por parte da Câmara Municipal, pelo que não foram considerados neste estudo nem representados no modelo BIM, pois serão alvo de demolição.

As paredes exteriores do edifício são atualmente constituídas por alvenaria de granito e reboco, sendo que a espessura total das paredes é em média de 0,47 m, tendo sido feita a medição em diversos locais, indicados de forma esquemática na figura 6.



Localização	Espessura (m)
1	0.48
2	0.47
3	0.46
4	0.47

B

Figura 6: A. Localização das medições efetuadas, B. Respetivas espessuras da parede

Tendo obtido os 0.47 m de espessura média das paredes, foi feita a picagem da parede em 2 locais (junto às localizações 1 e 4 do esquema anterior), de forma a identificar a espessura que efetivamente corresponde à alvenaria de pedra de granito. Assim, obteve-se a espessura de aproximadamente 3 cm de camada de reboco tanto pelo interior como pelo exterior, e 41 cm de espessura aproximada de alvenaria de pedra de granito, conforme esquematizado na figura 7.

Constituição da parede em contacto com o exterior:

- 1 - reboco de cal + pintura (exterior): 3 cm
 - 2 - granito: 41 cm
 - 3 - reboco de cal + pintura (interior): 3 cm
- Espessura total parede exterior: 47 cm

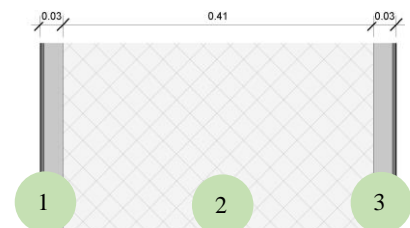


Figura 7: Constituição da parede em contacto com o exterior – corte

As paredes divisórias com os edifícios adjacentes são paredes simples, sendo esta comum aos dois edifícios, constituída por alvenaria de granito e uma camada de reboco de aproximadamente 3 cm no piso 0 e piso 1 (no sótão não existe a camada de reboco), não existindo qualquer tipo de isolamento entre os dois edifícios.

Não sendo possível fazer a medição nestas paredes, estima-se, de acordo com as medições efetuadas nas paredes exteriores, que a alvenaria de pedra de granito seja igualmente de aproximadamente 41 cm.

As paredes da zona da cozinha, que foram construídas posteriormente, são feitas em alvenaria de tijolo e reboco, com 20 cm de espessura no total, pelo que também não possuem qualquer tipo de isolamento.

As paredes interiores do piso 1 são em tabique, com cerca de 10 cm de largura. A cobertura do edifício é atualmente apenas constituída pela telha assente sobre varas e madres de madeira, sem nenhum tipo de isolamento (figura 8).

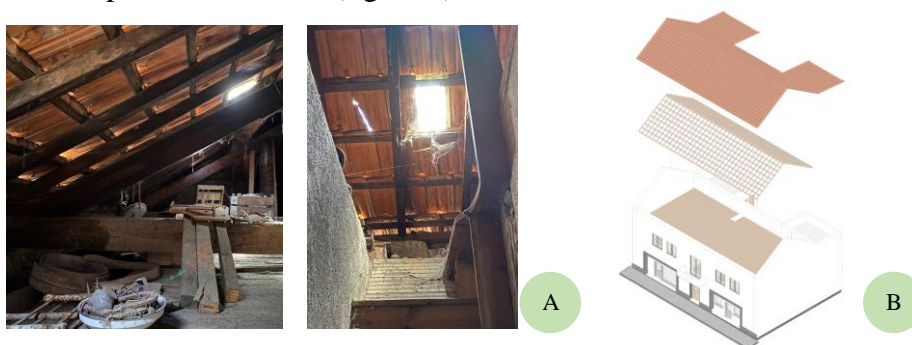


Figura 8: A. Fotografias da cobertura; B. Axonometria da constituição da cobertura (modelo BIM)

Análise bioclimática do local. A análise bioclimática do local foi realizada através de programas que têm como base as estações meteorológicas mais próximas à localização do edifício.

Através do programa Meteonorm, é possível verificar as variações de temperatura ao longo do ano, que variam desde os 35 °C no pico do verão, aos 5 °C negativos no pico do inverno. É também possível verificar as variações de temperatura que existem ao longo de um dia (figura 9). A análise dos ventos predominantes foi realizada através da fonte Windfinder (figura 10), utilizando a estação meteorológica mais próximas de Pinhel: Saelices El Chico / Ciudad Rodrigo (cerca de 38 Km de distância).

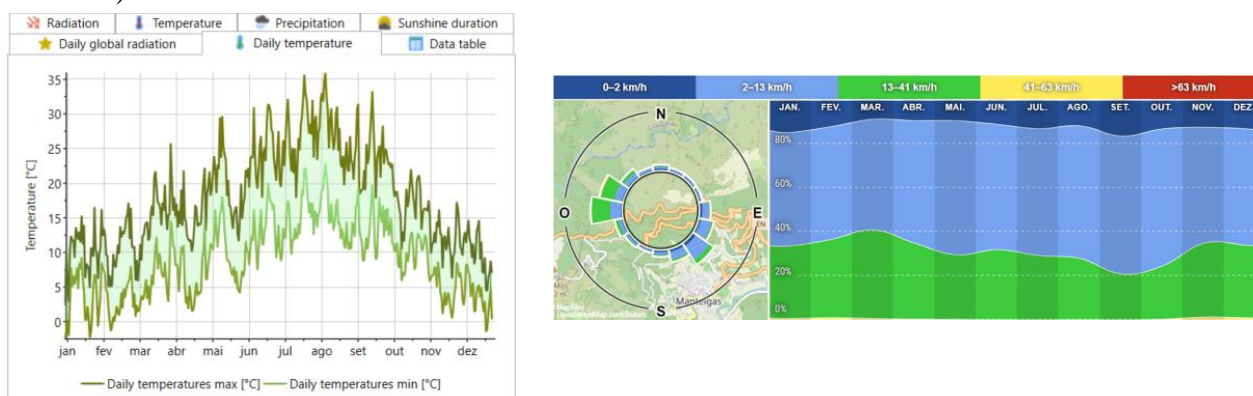


Figura 9: Temperatura ao longo do ano (fonte: Meteonorm); estatísticas mensais da velocidade e direções do vento para Saelices El Chico (fonte: Windfinder)

Analisado o contexto bioclimático do local, verificou-se que não há uma direção predominante dos ventos ao longo do ano, sendo este bastante homogêneo de todas as direções. A análise solar do edifício foi realizada no próprio programa Revit, onde foi possível observar as zonas do edifício onde há maior e menor incidência de luz solar ao longo do dia. A partir desta análise conclui-se que existe uma maior incidência solar ao longo do dia na zona do logradouro, em comparação com a fachada da rua principal. Durante parte da manhã há maior incidência de luz solar na fachada tardoz, e durante parte da parte há maior incidência de luz solar na fachada frontal, conforme se pode verificar na figura 10.

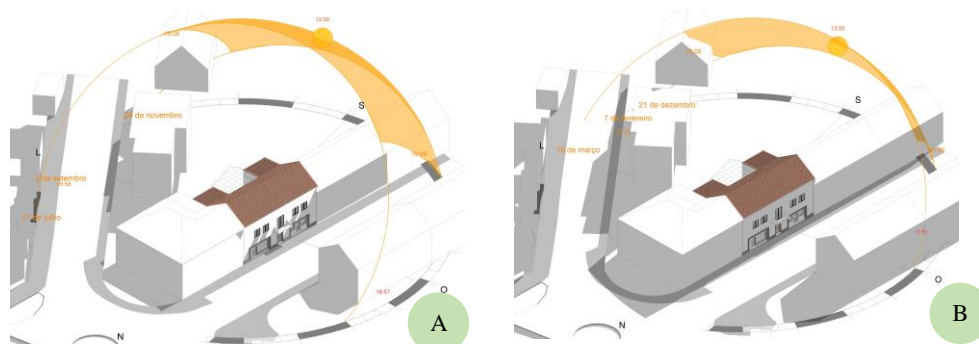


Figura 10: A. Esquema de estudo solar no verão, B. Esquema de estudo solar no inverno (modelo BIM)

Projeto de reabilitação. O objetivo deste projeto de reabilitação relaciona-se com a necessidade de melhorar a eficiência energética do edifício, e de aumentar a área útil deste, de forma a tirar o melhor partido das condições atuais. Assim, o programa de reabilitação do edifício em estudo, teve como base um programa que incidiu em vários aspetos para melhoria das condições habitacionais deste, tais como:

- Reabilitação estrutural, com a proposta de duas lajes novas interiores (piso 1 e piso 2);
- Aumento da área útil do edifício, com o aproveitamento do piso 2 para quartos (onde atualmente se encontra o sótão);
- Abertura de vãos no piso 2 para a zona exterior do logradouro;
- Intervenção ao nível do piso 0, com aproveitamento para uma loja comercial e uma garagem de apoio aos dois apartamentos.

A abordagem para o desenvolvimento deste projeto passou pela análise bioclimática do local, a análise da eficiência energética e também uma análise subjetiva em relação aos ruídos da rua.

A proposta passa pela complementação do antigo com o novo, mantendo a memória da fachada antiga na zona do edifício virada para a rua principal e em parte da fachada do logradouro, e uma parte de edifício novo com uma linha contemporânea na zona do logradouro (figura 11).

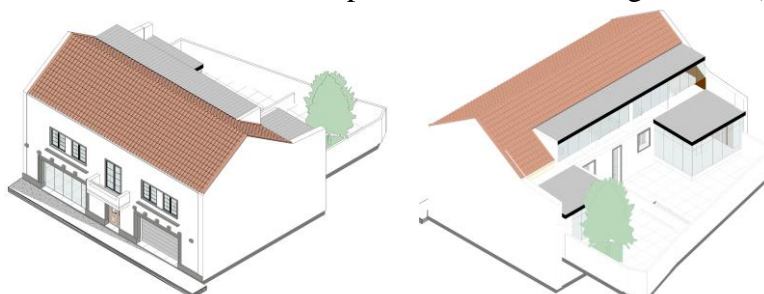


Figura 11: Axonometria da proposta de projeto (modelo BIM)

Tendo em conta as questões analisadas, optou-se pela colocação das zonas sociais das salas dos dois apartamentos na zona em contacto com a rua principal, uma vez que esta é uma zona mais ruidosa do que a parte virada para o logradouro, e, que tem maior incidência da luz solar ao fim da tarde. Na zona virada para o logradouro, optou-se pela colocação das cozinhas no piso 1, para contacto direto com o espaço exterior, e os quartos no piso 2, com maior incidência da luz solar no início do dia. Nas salas de estar optou-se por um pé direito duplo, para permitir a iluminação natural e ventilação da zona dos corredores dos quartos (figura 12). O projeto foi concebido de forma a fomentar a ventilação natural, através da possibilidade de ventilação cruzada ao nível do piso 1, visto esta ser a técnica mais simples e eficaz para ventilar todo o espaço em *open space*, e, conseqüentemente, o edifício, através de duas aberturas opostas que possibilitam o vento entrar e sair do local.



Figura 12: Plantas e axonometrias da proposta (modelo BIM): A. Piso 1, B. Piso 2

Sendo o tema em foco neste trabalho a melhoria da eficiência energética do edifício, são frisadas as seguintes intervenções:

- Alteração das caixilharias e dos envidraçados para soluções termicamente mais eficientes;
- Aplicação de isolamento com aglomerado de cortiça expandida nas paredes divisórias com os edifícios adjacentes e nas paredes exteriores;
- Aplicação de isolamento com aglomerado de cortiça expandida na cobertura
- Aproveitamento de energia solar por meio de painéis fotovoltaicos;
- Aplicação de bomba de calor para aquecimento das águas e produção de energia.

A bomba de calor, pelo novo Decreto-Lei n.º 101-D/2020 é entendido como um equipamento que produz energia renovável, uma vez que tem uma poupança significativa nos consumos de energia em relação a outros sistemas convencionais. Se tivermos em conta o coeficiente de desempenho (COP) de uma bomba de calor, ou rácio entre energia fornecida e energia utilizada, de 4, significa que esta consome apenas 1 kW de eletricidade para fornecer mais de 4kW de energia.

Para além da promoção da ventilação natural através da localização dos vãos, é também proposta a ventilação mecânica através do sistema da bomba de calor. A ventilação mecânica é especialmente importante nas épocas em que o diferencial entre temperatura interior e exterior é maior, pois permite mitigar as perdas de calor ou frio. Ao privilegiar este tipo de ventilação verificam-se diversas vantagens, essencialmente devido à poupança nas trocas de energia, uma vez que é o próprio equipamento que faz as trocas de ar, permitindo alcançar a estanquidade ao ar.

Análise energética com ferramentas de simulação. A análise energética foi realizada através do plugin Insight para o programa Revit, que permitiu analisar diversas questões como a incidência de luz solar no exterior e no interior do edifício, e os custos associados à produção de energia no edifício, tendo sido feita uma comparação entre o que existe atualmente e o projeto proposto.

Foi definido no software a localização do edifício, a partir da qual, o próprio plugin identifica a estação meteorológica mais perto, e tem em consideração as características climáticas desta em cada uma das simulações.

O *norte verdadeiro* do projeto foi também definido, a partir do qual foi efetuada a análise solar (insolação exterior) e análise de insolação interior do edifício. A primeira foi calculada dentro do próprio Revit recorrendo ao plugin Insight, e a segunda foi calculada no serviço da *cloud* (figura 13).

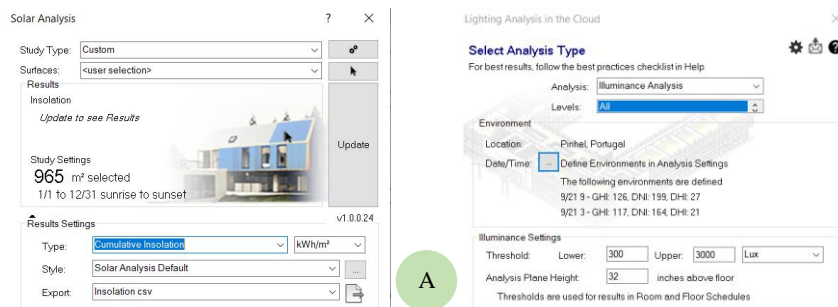


Figura 13: Configurações para análises (Insight): A. Análise Solar (insolação exterior), B. Insolação interior

Foram realizadas duas simulações energéticas através do serviço na *cloud* do plugin Insight, uma para o edifício existente e outra para o projeto proposto, sendo que, para uma correta simulação e respetiva análise, algumas questões foram alvo de particular atenção, nas *configurações de energia* (figura 16):

- Foi selecionado o modo *utilizar elementos de construção*, para que a análise fosse efetuada exatamente com os elementos de construção definidos no modelo;
- Foi definido como nível de referência o piso 1, para as duas análises;
- Foi definido o tipo de construção como *dormitório/alojamento*;
- Foram definidos, na primeira análise, o sistema AVAC atual (*gás de sistema dividido/compacto residencial 14 SEER/0.9 AFUE <5,5 ton*), e na segunda, o sistema AVAC proposto (*bomba de aquecimento de sistema dividido compacto residencial 14 SEER/8,3 HSPF*). Estes sistemas foram escolhidos dentro das opções do próprio programa, tendo sido as opções mais similares encontradas para efeitos da simulação energética, sendo: SEER – valor da relação de eficiência energética sazonal em arrefecimento, AFUE – eficiência anual de utilização de combustível, HSPF – fator de desempenho sazonal para aquecimento;
- Foi selecionada a opção de aplicar as propriedades térmicas do material conforme os elementos detalhados.

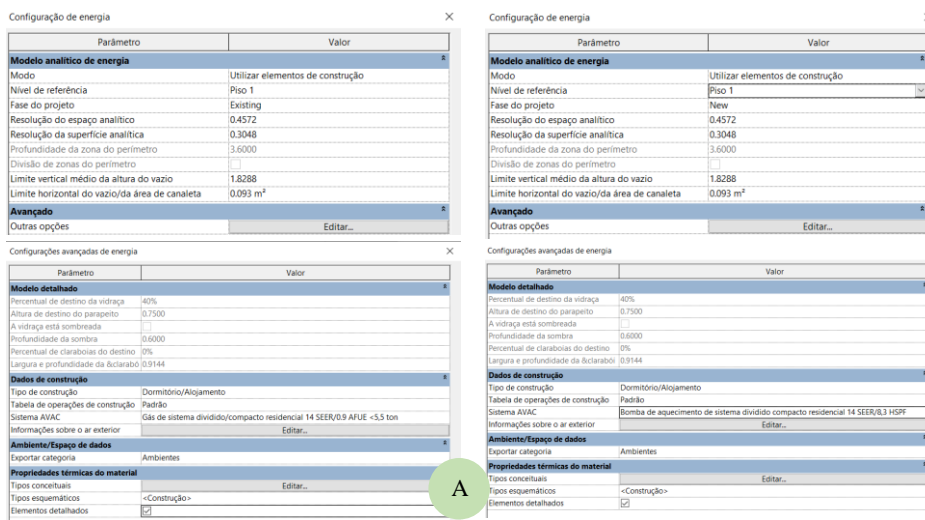


Figura 14: Configurações de energia relativos a – A. Existente; B. Proposta (plugin Insight)

Para uma correta aplicação das propriedades térmicas dos elementos detalhados, foram definidas as características térmicas tanto para os materiais existentes de maior relevância, na primeira análise, como para os materiais propostos de maior relevância, na segunda análise. Foram utilizadas aqui as propriedades térmicas do próprio programa Revit. Após a definição das questões mencionadas, foi então criado o modelo analítico de energia no plugin Insight, que permitiu inspecionar e validar o modelo analítico de energia antes da simulação de energia na *cloud* (figura 15).

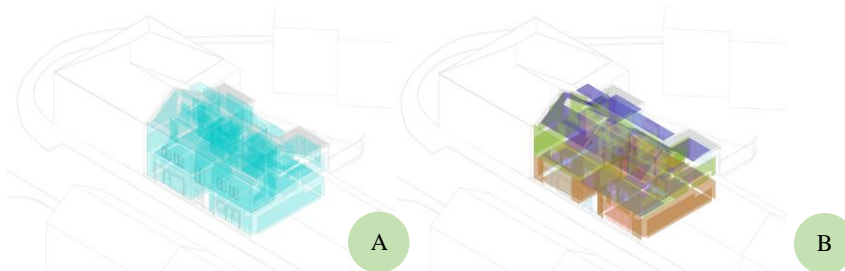


Figura 15: Modelo analítico de energia – A. espaços analíticos, B. superfícies analíticas (Revit e Insight)

Por fim, foi então gerada a simulação energética do desempenho do edifício na *cloud*, de forma a determinar os resultados de desempenho possíveis e as opções de projeto.

Já na *cloud*, o primeiro resultado obtido em cada uma das análises foi um resultado mais generalista, e a partir deste, foi possível definir *cenários* com outros parâmetros que não foram definidos no modelo BIM, para uma correta interpretação dos resultados, como por exemplo a eficiência da iluminação, o controle de iluminação natural e ocupação e a eficiência de carga de tomadas.

Foram também definidos os parâmetros em que apenas o modelo BIM deveria ser considerado para o cálculo, como a orientação do edifício, as sombras nas janelas, o tipo e proporção das janelas, os materiais de construção das paredes e do telhado, e o sistema de AVAC.

Ponderação dos resultados. A simulação solar permitiu obter informações complementares e mais precisas acerca da incidência da luz solar no edifício, para definição do melhor local para a colocação dos painéis fotovoltaicos. Podemos verificar, na figura 16, que o software demonstra, através de um gráfico de cores, as áreas de cobertura com maior insolação. A escala entre o modelo do projeto existente e o modelo do projeto proposto é diferente, pois o próprio software cria uma escala de acordo com o máximo e o mínimo de insolação presente no modelo.

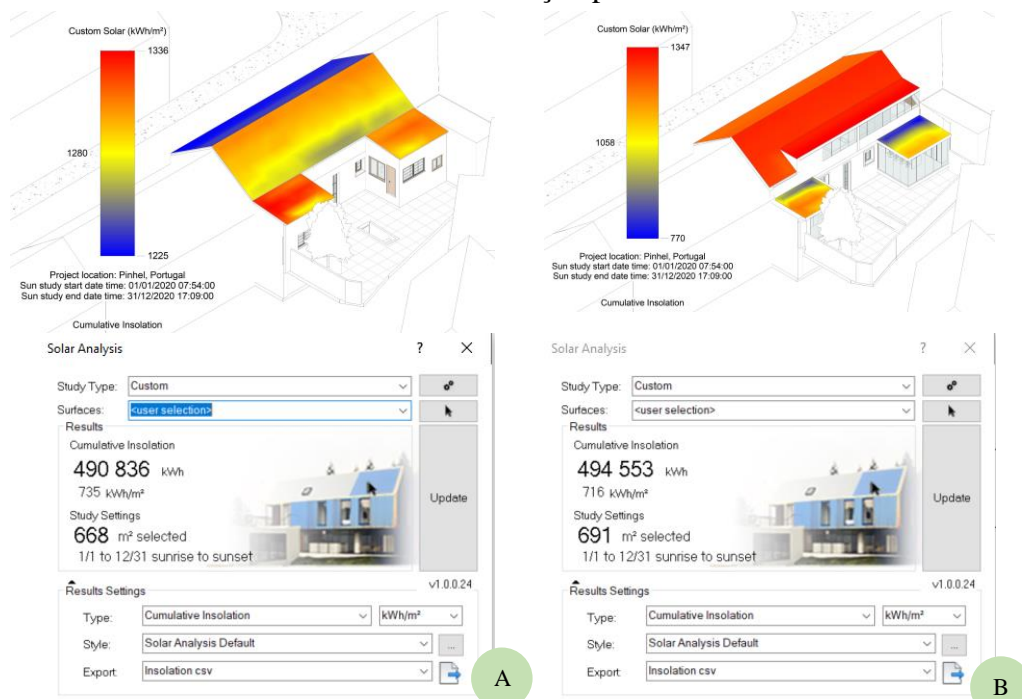


Figura 16: Análise incidência luz solar – A. Existente, B. Proposta (plugin Insight)

Através desta análise, verificou-se que, no projeto proposto, o volume do piso 2 recebe a maior incidência de luz solar, sendo, portanto, o local ideal para a colocação dos painéis fotovoltaicos.

Ao selecionar apenas a superfície onde se pretende estudar a possibilidade de colocação dos painéis fotovoltaicos, é calculada ainda a quantidade de energia que poderia ser produzida ao utilizar toda a superfície para este fim, as poupanças que se poderiam atingir, e o tempo de retorno do investimento estimado, conforme se pode verificar na figura 17.

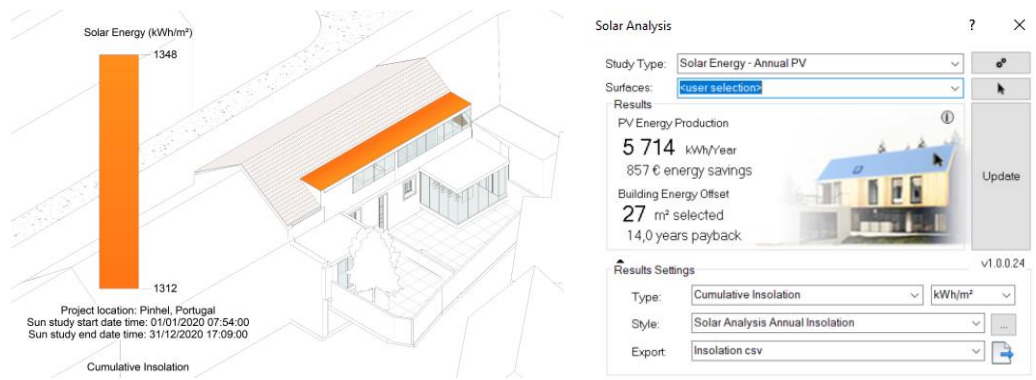


Figura 17: Insolação, energia produzida e tempo de retorno de investimento (plugin Insight)

Em relação à luz solar que o edifício recebe no seu interior, de acordo com o existente, verificou-se, através do plugin Insight para o programa Revit, uma maior presença de luz na zona do edifício junto ao logradouro, conforme a figura 18-A. Ao eliminar as paredes interiores, criando um espaço em *open space* entre a sala de estar, sala de jantar e cozinha, a luz interior torna-se mais uniforme, havendo uma maior incidência de luz solar na zona da cozinha durante parte de manhã, e uma maior incidência de luz solar na zona da sala de estar durante parte da tarde (figura 18-B).

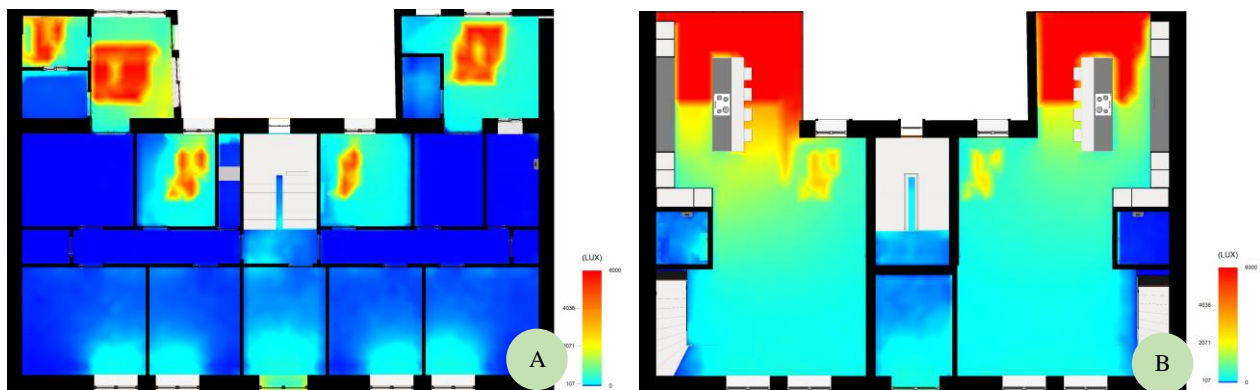


Figura 18: Análise de insolação interior – A. Existente, B. Proposta (plugin Insight)

As escadas para o andar superior e as instalações sanitárias de serviço foram colocadas em zonas de menor insolação. Na zona da cozinha que recebe uma insolação, poderão ser colocados brises solares móveis, permitindo que sejam regulados conforme se pretenda aumentar ou diminuir a insolação, principalmente nas estações mais quentes. Em relação à análise energética na *cloud* e obtenção de uma estimativa de custos anuais, após definição de todos os parâmetros tanto na simulação energética do edifício existente como no projeto proposto, obtém-se uma diferença significativa nos custos de energia (figura 20).

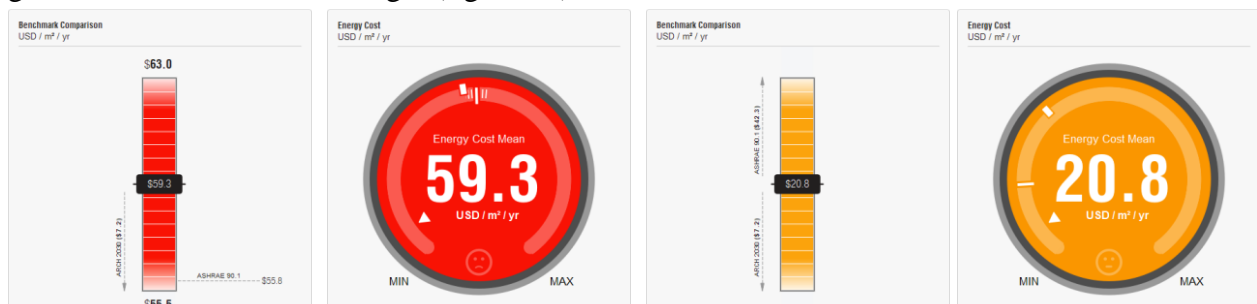


Figura 19: Comparação custos de energia - A. Existente; B. Proposta (Insight)

Foi possível, através das propostas de reabilitação para o edifício em estudo, uma redução de quase 60% nos custos de energia, passando de 59.3 dólares americanos por metro quadrado por ano (cerca de 55 euros) no edifício existente, para 20.8 dólares americanos por metro quadrado por ano (cerca de 19 euros) no projeto proposto. Os resultados da proposta consideram um limite de retorno de pagamento de 30 anos, definido na própria análise da *cloud* no Insight.

Conclusões

A reabilitação de edifícios, para além de apresentar um desafio relacionado com a integração da eficiência energética, apresenta também oportunidades para o aperfeiçoamento na forma de pensar o projeto desde a fase de conceção até a sua execução e obra. Utilizando uma abordagem holística na fase de conceção do projeto, é possível observar como os fatores externos afetam o edifício e, conseqüentemente os habitantes deste. A análise bioclimática é essencial para uma reabilitação que tem como base a otimização do desempenho energético e as condições de habitabilidade do edifício. Ao longo deste trabalho, foram analisadas diferentes soluções nos domínios do conforto térmico interior, produção de energia solar e redução global dos consumos de energia. Diversos cenários foram simulados, com diferentes opções de projeto, de forma a chegar a uma proposta que respondesse aos objetivos estipulados inicialmente, apresentada neste trabalho. Tratando-se de uma reabilitação, não seria possível otimizar a orientação do edifício, que, como se verificou, é um fator bastante importante na própria análise energética e nos custos anuais relacionados com a produção de energia. A importância deste trabalho, de forma geral, foi contribuir para a forma de pensar o projeto de reabilitação na fase de conceção, e, em particular, sugerir possibilidades de reabilitação de medidas de eficiência energética. A abordagem BIM desempenhou um grande contributo no trabalho, especialmente na análise das melhorias económicas, que se associam, às melhorias físicas.

Apesar do grande contributo que o software utilizado pode fornecer aos projetistas, é necessário existir sempre um contributo do próprio projetista, não sendo plausível confiar na totalidade nas ferramentas de simulação, pois pequenas diferenças no próprio projeto podem alterar o resultado final. Afinal, para um projeto final de qualidade, é sempre importante ter em conta as necessidades do cliente e a forma como este irá vivenciar a casa, as questões de habitabilidade, as questões económicas e a própria sensibilidade do projetista.

Referências

- [1] Dauletbek, A. & Zhou, P. *BIM-based LCA as a comprehensive method for the refurbishment of existing dwelling considering environmental compatibility, energy efficiency, and profitability: a case study in China*, Journal of Building Engineering, 46 (2022) 103852. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2021.103852>.
- [2] DECO Proteste (2001). Teste Saúde, 34, nov/dez 2001, 15-18.
- [3] Fernandes, J., Pimenta, C., Mateus, R., Silva, S. & Bragança, L. *Contribution of portuguese vernacular building strategies to indoor thermal comfort and occupants' perception*. Buildings, 5 (2015) 1242-1264. doi: 10.3390/buildings5041242
- [4] Fernandes, J., Malheiro, R., Castro, M., Gervásio, H., Silva, S. & Mateus, R. *Thermal performance and comfort condition analysis in a vernacular building with a glazed balcony*, Energies, 13 (2020) 624. doi:10.3390/en13030624
- [5] Jaber, S. & Ajib, S. *Optimum, technical and energy efficiency design of residential building in Mediterranean region*, Energy and Buildings, 43 (2010) 1829-1834. doi: 10.1016/j.enbuild.2011.03.024
- [6] Missoum, M., Hamidat, A., Loukarfi, L. & Abdeladim, K. *Impact of rural housing energy performance improvement on the energy balance in the North-West of Algeria*, Energy and Buildings, 85 (2014) 374-388. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.09.045>
- [7] Pereira, V., Santos, J., Leite, F., Escórcio, P. *Using BIM to improve building energy efficiency – A scientometric and systematic review*, Energy & Buildings 250 (2021) 111292. doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111292
- [8] Pinho, F. *Reabilitação estrutural de paredes de alvenaria de pedra tradicional*, Nova FCT Editorial (1ª Ed.), Caparica (2021).

- [9] Poggi, F., Firmino, A., Amado, M. & Pinho, F. Natural stone walls in vernacular architecture: What contribution towards rural nzeb concept? *Bulletin de La Société Géographique de Liège*. <https://popups.uliege.be/0770-7576/index.php?id=4125>, (2015).
- [10] Popescu, D., Bienert, S., Schutzenhofer, C. & Boazu, R. *Impact of energy efficiency measures on the economic value of buildings*, *Applied Energy*, 89 (2011) 454-563. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.08.015>
- [11] Santos, I., Sousa, L. & Louraço, J. *Granite resource evaluation: example of an extraction area in the north of Portugal*, *Environmental Earth Sciences*, 77 (2018) 608. doi: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7780-0>
- [12] Sekularac, N., Ristic, N., Mijovic, D., Cvetkovic, V., Barisic, S. & Ivanovic-Sekularac, J. *The use of natural stone as an authentic building material for the restoration of historic building in order to test sustainable refurbishment: case study*, *Sustainability*, (2019) 4009. doi: 10.3390/su11154009
- [13] Sousa, L., Barabasch, J., Stein, K. & Siegesmund, S. *Characterization and quality assessment of granitic building stone deposits - a case study of two different Portuguese granites*, *Engineering Geology*, 221 (2016) 29-40.
- [14] <https://gbs.autodesk.com/OneEnergy/Insight>, para simulação de análise energética na *cloud*
- [15] <https://meteonorm.com/en/>, em 08/12/2021.
- [16] <https://www.google.pt/maps>, em 05/02/2022
- [17] pt.windfinder.com, em 08/08/2021.

Risco de Incêndio Georreferenciado do Centro Histórico de Viana do Castelo

MARTINS Ana^{1, a} e GONÇALVES Miguel^{1, b}

¹Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n 4200-465 Porto, Portugal

^aac.rock.martins@gmail.com, ^bmiguelcg@fe.up.pt

Palavras-chave: Segurança Contra Incêndio em Edifícios, Risco de Incêndio, Mapa de Risco de Incêndio, Modelo CHICHOrRO, Georreferenciação do Risco de Incêndio.

Resumo. O Risco de Incêndio (RI) do Centro Histórico de Viana do Castelo (CHVC) foi estudado através duma representação georreferenciada, recorrendo ao Modelo de Análise de Gestão de Risco do modelo CHICHOrRO 4.1 – Cálculo Holístico do Risco de Incêndio da Construção e Habilitada Otimização da sua Redução com Obras –, em colaboração com a Câmara Municipal de Viana do Castelo (CMVC).

O modelo analisa parâmetros característicos do edifício e da sua envolvente, usando-os para determinar o valor do RI e compará-lo com o valor considerado aceitável para aquele tipo de uso da construção. O modelo permite fazer a reavaliação do RI, de modo a diminuí-lo, ao implementar medidas mitigadoras de forma otimizada, técnica e financeira.

Para a recolha e tratamento dos dados, e apresentação dos resultados, usaram-se ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica como o Portal da Proteção Civil da CMVC e a aplicação ArcGIS Collector.

Foram analisados 145 edifícios do CHVC e elaborados Mapas de RI. Identificaram-se os edifícios com maior RI e propuseram-se medidas futuras a serem adotadas pelo município, potenciando melhorias no Risco de Incêndio numa escala urbana.

Com base no modelo, foi proposto um método de classificação de RI de quarteirões de centros históricos, com fim de possibilitar uma avaliação da gestão urbana de incêndio a nível das autarquias locais.

Concluiu-se que seria possível diminuir o RI de 73% dos edifícios analisados do CHVC, tornando-o mais seguro do ponto de vista da Segurança Contra Incêndio em Edifícios.

Introdução

Os centros históricos portugueses apresentam, em geral, um edificado envelhecido e degradado, tendo levado, na última década, a um aumento do número de obras de reabilitação. No entanto, o risco de incêndio está presente em todo o tipo de edifícios, quer nos novos e nos reabilitados, quer nos antigos, assim como durante as obras.

Outro problema muito comum é a falta de acessibilidade por parte dos bombeiros em caso de emergência. São frequentes as ruas estreitas e sinuosas dificultando o trabalho dos bombeiros e a sua rápida intervenção. É necessário tomar medidas para compensar a existência desta fragilidade.

As principais preocupações da Segurança Contra Incêndio em Edifícios (SCIE) são a preservação das vidas humana e animal, do ambiente e do património. Este último é outro foco da SCIE em centros históricos, uma vez que grande parte do património histórico e cultural das cidades se encontra nos seus centros históricos.

O Centro Histórico de Viana do Castelo, apesar de cada vez mais reabilitado, ainda tem vários edifícios devolutos ou em mau estado de conservação. Basta apenas um edifício não estar nas condições exigidas pela legislação de SCIE para pôr em causa os restantes edifícios da sua envolvente, mesmo que estes estejam em bom estado de conservação e em cumprimento das regras.

Centro Histórico de Viana do Castelo

Pelos dados dos Censos de 2011 verifica-se que o CHVC tem 3470 habitantes e 2601 alojamentos (634 vagos) numa área de 61ha. [1] Em 2013 contabilizavam-se 259 edifícios com deficiências construtivas sendo que 156 deles precisavam de intervenção. [2]

Para reabilitar o centro histórico, foi criada, em 2013, a Área de Reabilitação Urbana do Centro Histórico de Viana do Castelo (ARU-CHVC). Este projeto trouxe medidas de dinamização da reabilitação do edificado como: reduções e isenções de taxas e impostos, simplificação de atos administrativos e disponibilização de equipas de apoio ao sector da reabilitação. [3]

A ARU-CHVC engloba o núcleo medieval e as áreas adjacentes de expansão da cidade, sendo delimitada a norte e nascente pelo caminho-de-ferro, a sul pela avenida João Alves Cerqueira, largo Tomás da Costa e Jardim Marginal e a poente pela avenida do Campo do Castelo (Figura 1). [3]

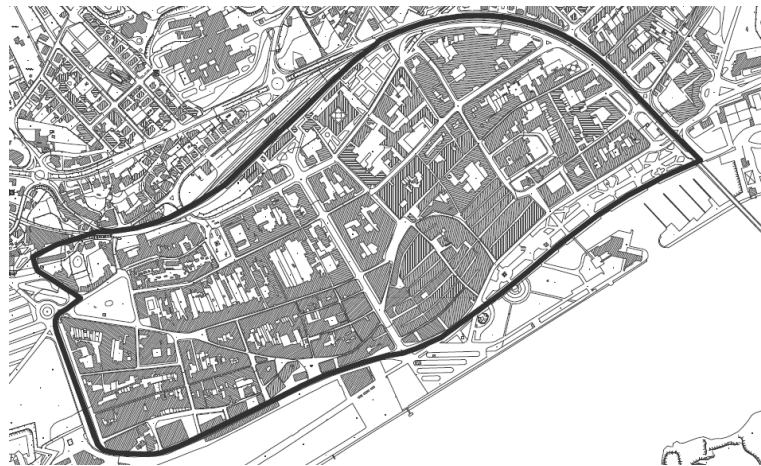


Figura 1: Representação dos limites do CHVC [3]

Na elaboração deste trabalho foi usada uma divisão do CHVC, utilizada pela Câmara Municipal de Viana do Castelo, com quatro setores: Alfa, Bravo, Charlie e Delta (Figura 2). A divisão tem por base os tipos de conjunto edifícios-arruamentos existentes, sendo umas zonas mais amplas e outras fechadas e sinuosas que não permitem o acesso dos veículos de emergência. Uma zona é mais antiga e com muitos edifícios reabilitados ou em más condições, outras mais recentes e em bom estado de conservação.

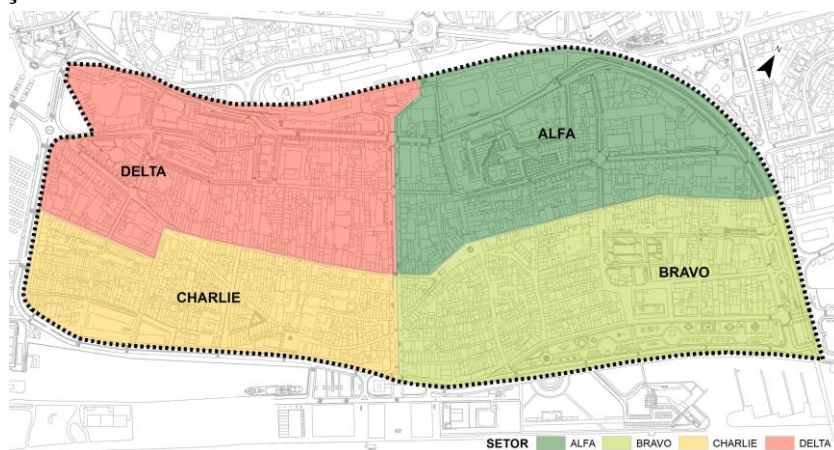


Figura 2: Divisão do CHVC em setores (fonte: CMVC)

O CHVC é abrangido por duas corporações de bombeiros: a Companhia de Bombeiros Sapadores de Viana do Castelo (CBSVC) – o terceiro corpo de bombeiros mais antigo do país [4] - e os Bombeiros Voluntários de Viana do Castelo (BVVC).

Tendo em conta a Nota Técnica nº 08 que define o grau de prontidão, é possível dizer que qualquer edifício ou recinto do CHVC tem garantia de prontidão da parte da CBSVC e dos BVVC.

Risco de Incêndio

O perigo está sempre presente e o risco varia com a utilização de medidas mitigadoras do perigo.

O risco (R) pode ser definido como o produto da probabilidade (P) e da gravidade (G) de um evento acontecer (Figura 3).

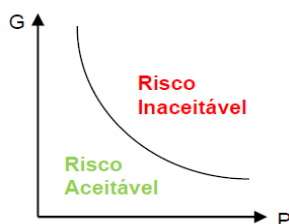


Figura 3: Representação Gráfica do Risco

O conceito de risco aceitável varia sobretudo do entendimento por parte das autoridades ao materializar a regulamentação específica de SCIE, da percepção distinta de pessoa para pessoa e ainda a sua evolução com o passar do tempo. Assim, o risco é considerado aceitável quando cumpre todas as condições impostas pela legislação em vigor à data da análise. Quando essas condições não são cumpridas tem-se um risco inaceitável, pois não está assegurada a segurança dos ocupantes dos edifícios, dos edifícios patrimoniais e do ambiente.

Percebe-se que não existe um risco nulo, sendo o objetivo de uma análise de risco minimizá-lo e não eliminá-lo. Para isso, são usadas medidas de prevenção, para diminuir a probabilidade de um evento acontecer, e medidas de proteção, para diminuir a gravidade desse potencial evento.

Existem vários Modelos de Análise de Risco de Incêndio. O Método de Gretener é a base de todos os outros existentes, como o ARICA [5] e o CHICHOrRO [6].

Modelo CHICHOrRO

O modelo CHICHOrRO, Cálculo Holístico do Risco de Incêndio da Construção e Habilidade Otimização da sua Redução com Obras, apresentado em 2015 por Daniel Martins na sua dissertação de mestrado em Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto [7], foi desenvolvido a partir de modelos anteriores - MARIEE&FEUP e MARIEE. Desde aí tem vindo a ser alterado e melhorado até à versão 4.1 usada neste trabalho [8].

Este método considera o Risco de Incêndio o produto da Probabilidade de ocorrência (P) e da Gravidade (G) das consequências dum incêndio (Equação 1).

$$\text{Risco (R)} = \text{Probabilidade (P)} * \text{Gravidade (G)} \quad (1)$$

A Probabilidade de Ocorrência (P) é definida pelo fator da Probabilidade de Ocorrência do Incêndio (POI) (Equação 2).

$$P = POI \quad (2)$$

A gravidade é ainda decomposta em três parâmetros, sendo o produto das Consequências Totais do Incêndio (CTI) e da média ponderada dos fatores de Desenvolvimento e Propagação do Incêndio (DPI) e de Eficácia de Socorro e Combate ao Incêndio (ESCI) (Equação 3).

$$G = CTI * (DPI+ESCI)/2 \quad (3)$$

Assim, o modelo CHICHOrRO define o Risco de Incêndio, RI, como sendo (Equação 4):

$$RI = POI * CTI * (DPI+ESCI)/2 \quad (4)$$

O modelo CHICHOrRO classifica os edifícios, segundo o seu Risco de Incêndio, com uma escala de intervalos de valores de $>1,7$ até $\leq 0,90$, correspondendo a uma classificação qualitativa

em 12 escalões, de F a A++, relativas respetivamente à probabilidade de ocorrência de incêndio iminente e muito baixa (Tabela 1).

Tabela 1: Classificação de Risco de Incêndio

Cor	Classificação	Probabilidade de RI	Intervalo de Valores
	A++	Muito Baixo	$RI \leq 0,90$
	A+	Baixo	$0,90 < RI \leq 0,95$
	A	Aceitável	$0,95 < RI \leq 1,00$
	B+	Pequeno +	$1,00 < RI \leq 1,05$
	B	Pequeno	$1,05 < RI \leq 1,10$
	B-	Pequeno -	$1,10 < RI \leq 1,15$
	C+	Médio +	$1,15 < RI \leq 1,20$
	C	Médio	$1,20 < RI \leq 1,25$
	C-	Médio -	$1,25 < RI \leq 1,30$
	D	Elevado	$1,30 < RI \leq 1,50$
	E	Muito Elevado	$1,50 < RI \leq 1,70$
	F	Iminente	$RI > 1,70$

O modelo está dividido em dois modelos de Análise de Risco de Incêndio: o Modelo de Análise de Risco de Incêndio (MARI) e o Modelo de Análise de Gestão de Risco (MAGR). O MARI é muito pormenorizado e o MAGR é uma simplificação sua, sendo necessários menos dados para obter uma classificação do RI.

Após a análise do RI dum edifício nas suas condições atuais é possível implementar medidas de intervenção para estudar o seu efeito na redução do risco inicial. O modelo MAGR tem 21 medidas de intervenção associadas, criadas na versão 4.1 do modelo CHICHOrRO: colocação de hidrantes exteriores a <30m do edifício, redução do estacionamento condicionado pela câmara, redução das infiltrações, e combinações de instalação de dispositivos de sinalização, iluminação, deteção e extinção. O modelo MARI permite até 32 medidas passivas e ativas de intervenção.

Análise do Risco de Incêndio do CHVC com o modelo CHICHOrRO 4.1

O CHVC tem 1783 edifícios distribuídos por 95 quarteirões [2]. Destes, 154 edifícios foram estudados e apenas 145 edifícios foram analisados. Os restantes nove não foram considerados por se encontrarem em obras, devolutos ou não terem ocupação, saindo do âmbito de aplicação do modelo. A designação utilizada nos quarteirões e lotes é a que consta na geodatabase do setor de Informação Geográfica da CMVC (Figura 4).

Na zona Alfa há ruas largas, edifícios de várias idades, mas todos em boas condições de conservação. Foram analisados 15 edifícios, 3 no quarteirão 29, sendo os edifícios da Câmara Municipal de Viana do Castelo, e 12 no quarteirão 30, edifícios maioritariamente de habitação, mas com outros usos a nível do R/C.

A zona Bravo é onde se encontra o Núcleo Medieval, a zona mais antiga da cidade, com arruamentos estreitos, vários dos quais não permitindo a passagem de veículos de emergência, e com a ausência de uma rede de hidrantes completa. Os edifícios, em relação ao estado de conservação, vão de reabilitados a devolutos, na maioria habitacionais e muitos com comércio ou restauração no R/C. Foram estudados 46 edifícios, mas só analisados 43 (6 no quarteirão 41, 15 no quarteirão 42 e 22 no quarteirão 45).



Figura 4: Quarteirões do CHVC estudados

Na zona Charlie foram analisados 60 dos 65 edifícios estudados: 4 no quarteirão 77, 28 no quarteirão 78, 14 no quarteirão 79 e 14 no quarteirão 80. É uma zona composta por quarteirões bem definidos. A maioria das ruas tem boas condições de acesso aos veículos dos bombeiros. Grande parte do edificado está em bom estado de conservação e a maioria é de habitação.

A zona Delta é ampla e tem melhores condições para o combate ao incêndio por parte dos bombeiros. Foram estudados 28 edifícios e analisados 27 (21 no quarteirão 83 e 6 no quarteirão 6).

O modelo MAGR usa nove parâmetros característicos do edifício e da sua envolvente para determinar o valor do Risco de Incêndio: utilização-tipo, ano de construção, altura do cenário de incêndio, estado de conservação, acesso das viaturas dos bombeiros, distância dos hidrantes, área do cenário de incêndio, efetivo do cenário de incêndio e dispositivos de sinalização, iluminação, deteção e extinção.

Estes dados foram obtidos e tratados através do Portal da Proteção Civil da CMVC e da aplicação ArcGIS Collector.

Utilizações-tipo do Edificado. A utilização-tipo (UT) estudada em cada edifício é a que se considera ser potencialmente a pior de entre as existentes. De entre as doze UT definidas por lei, só foram encontradas as seguintes: UT I – Habitacionais 56%, UT III – Administrativos 7%, UT IV – Escolares 2%, UT V – Hospitalares 1% (e Lares de Idosos), UT VII – (Hoteleiros e) Restauração 14%, UT VIII – Comerciais 18% (e Gares de Transportes) e UT XII – Industriais 1%, Oficinas 1% (e Armazéns).

Na maioria dos edifícios considerou-se para estudo a UT I Habitacionais, com 56% (Figura 5).

Anos de Construção do Edificado. No modelo CHICHOOrRO 4.1 considera-se o ano de construção dos edifícios como <1951, 1951-1967, 1968-1974, 1975-1990, 1991-2008 e >2008, atendendo a aspetos distintos referentes à SCIE.

Os edifícios analisados foram, na sua maioria (56%), construídos antes de 1951 e não foram reabilitados entretanto. Os restantes valores da Figura 6 correspondem a: 19% entre 1991 e 2008, 16% depois de 2008, 8% entre 1975 e 1990, e 1% entre 1951 e 1967.

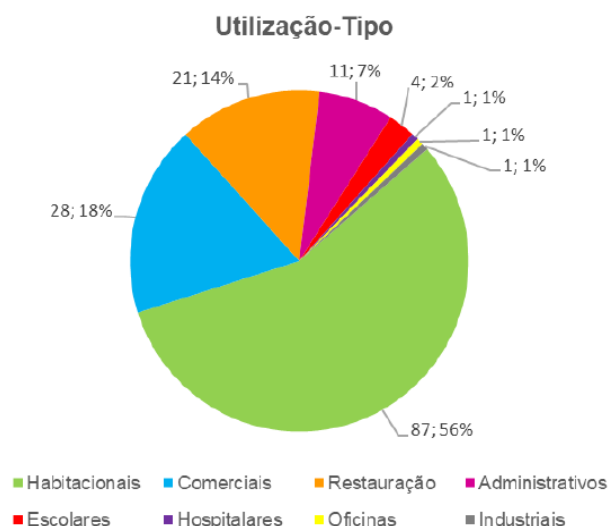


Figura 5: Utilizações-tipo do edificado analisado

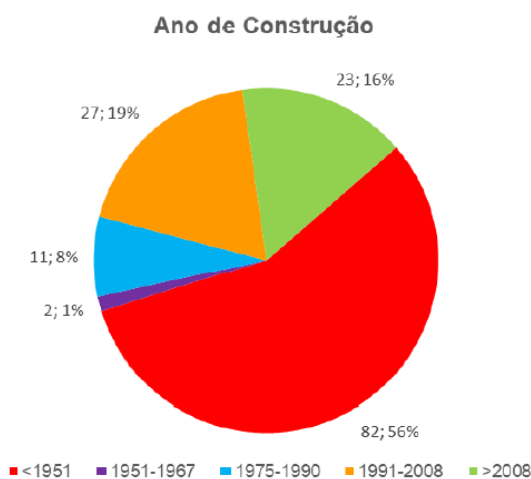


Figura 6: Anos de Construção do edificado analisado

Alturas dos Cenários de Incêndio. Os cenários de incêndio foram classificados como estando Abaixo do Plano de Referência, do R/C até ao 3º andar e >3º Andar. Esta divisão tem em conta a classificação da altura das UTs dos edifícios na regulamentação de SCIE: Pequena Altura com $\leq 9m$; Média Altura entre 9 e 28m; Grande Altura entre 28 e 50m; e Muito Grande Altura se maior de 50m.

Nos edifícios estudados, todos os cenários de incêndio se encontravam entre o R/C e o 3º andar, sendo considerados como de pequena altura.

Estado de Conservação do Edificado

Um edifício pode ser considerado, quanto ao estado de conservação, como sendo Bom, Médio, Mau, Devoluto ou Em Obras.

Os estados de conservação dos edifícios estudados (Figura 7) classificaram-se como: Bom (135), Médio (10), Mau (1), Devolutos (4) e Em Obras (4).

Acesso das Viaturas dos Bombeiros ao Edificado

O acesso das viaturas dos bombeiros aos edifícios divide-se em três opções: Acesso Possível (AP), Acesso a Veículos Ligeiros de Combate a Incêndio (AVLCI) e Sem Acesso (SA).

Dos edifícios estudados, apenas 27% têm Acesso Possível (Figura 8), 71% têm Acesso só a Veículos Ligeiros de Combate a Incêndio, e em 27% não é possível o seu acesso.

Estado de Conservação

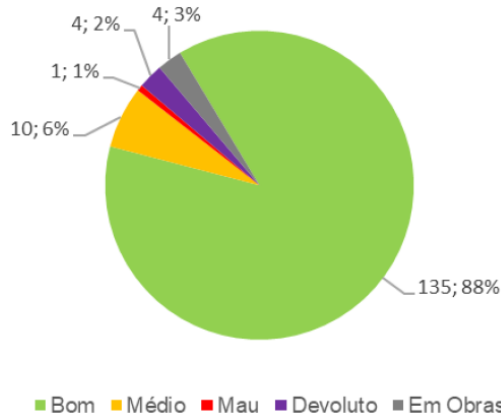


Figura 7: Estado de Conservação do edificado analisado

Acesso das Viaturas dos Bombeiros

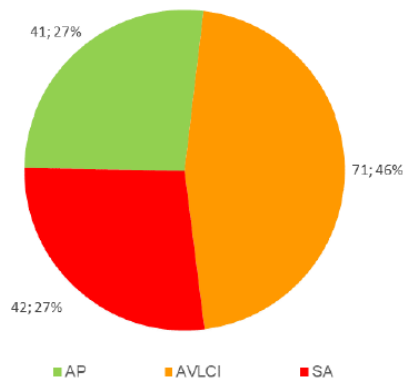


Figura 8: Acesso das Viaturas dos Bombeiros ao edificado analisado

Distância dos Hidrantes ao Edificado

A distância dos hidrantes é classificada como: Inferior a 30m, Superior a 30m ou Não Existentes.

Neste estudo consideraram-se como hidrantes existentes tanto os marcos de incêndio como as bocas de incêndio. Apenas 44% dos edifícios têm um hidrante a menos de 30m (Figura 9), o que é um valor muito baixo. Os restantes 56% dos edifícios têm hidrantes a mais de 30m.

Distância dos Hidrantes

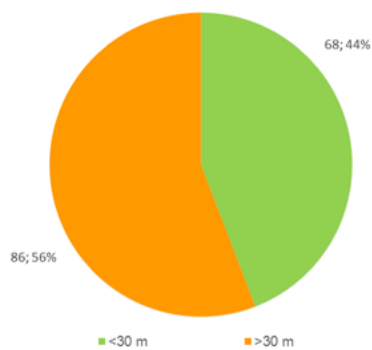


Figura 9: Distância dos Hidrantes ao edificado analisado

Áreas dos Cenários de Incêndio

As áreas brutas dos cenários de incêndio são divididas em intervalos inferiores ou iguais a: 50, 100, 120, 125, 150, 200, 250, 500, 800, 1000, 2000, 5000 ou 10000 m². Nesta análise, usaram-se os intervalos mais usuais para cada uma das UT existentes (\leq a 50, 100, 120, 125 ou 500).

Os edifícios estudados têm maioritariamente área ≤ 120 m² (56%), não contando com os 3% de ≤ 50 m² nem com os 38% de ≤ 100 m² (Figura 10). Os restantes 3% são edifícios com área ≤ 125 m².

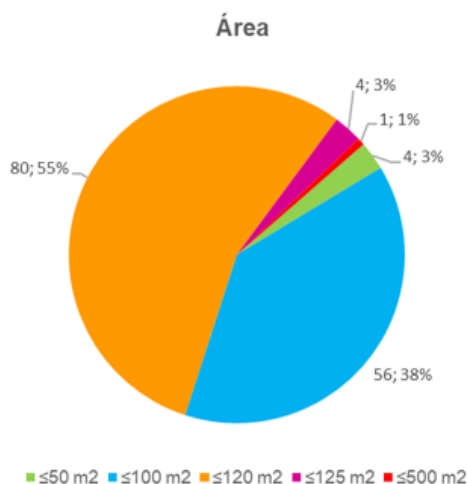


Figura 10: Áreas dos Cenários de Incêndio analisados

Efetivos dos Cenários de Incêndio

O efetivo (nº máximo de pessoas em simultâneo no cenário de incêndio) varia consoante a utilização-tipo e a área do cenário de incêndio e pode ir até: 3, 10, 15, 20, 25, 40, 50, 100, 150, 200, 300, 500, 1000, 2000 ou 5000 pessoas. Simplificando o cálculo do efetivo, são usados os valores mais comuns para cada tipo de UT (3, 10, 20, 40, 50 e 150).

Na maioria dos edifícios analisados, 56%, considerou-se terem um efetivo de até 3 pessoas, 30% têm até 40 pessoas, 7% têm até 10 pessoas, 3% têm até 20 pessoas, 3% têm até 50 pessoas e 1% tem até 150 pessoas (Figura 11).

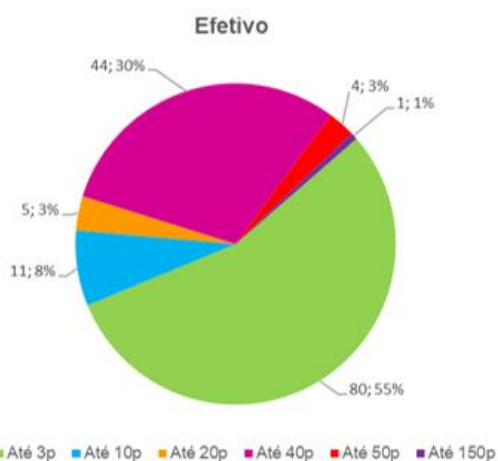


Figura 11: Efetivos dos Cenários de Incêndio analisados

Dispositivos de Sinalização, Iluminação, Detecção e Extinção

Este parâmetro tem quatro opções: Sinalização + Iluminação + Extinção (SIE), Sinalização + Iluminação + Detecção (SID), Sinalização + Iluminação + Extinção + Detecção (SIED) ou Não Existentes (CTI sem nada).

Foi feita uma análise conservadora quanto aos dispositivos de sinalização, iluminação, detecção e extinção, escolhendo a opção com menos equipamento existente. Assim, para os edifícios analisados, considerou-se que em 56% dos edifícios não há algum tipo de dispositivo (CTI sem nada), em 34% eles têm SIE e em 10% têm SID (Figura 12).

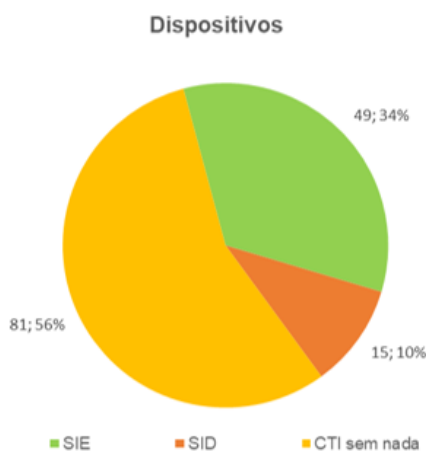


Figura 12: Dispositivos nos Cenários de Incêndio

Análise dos Resultados Obtidos

Depois de analisado o Risco de Incêndio de cada edifício foram estudadas quais as intervenções possíveis de modo a diminuí-lo. De entre as 21 medidas de intervenção existentes no MAGR foi aplicada a menor quantidade possível para fazer chegar ao valor mínimo de RI, cujo objetivo é a otimização económica da potencial intervenção. Esta condição foi satisfeita usando apenas Hidrantes exteriores a <30m do edifício (Intervenção #1), Redução de infiltrações (Intervenção #3), Detecção de incêndio dentro das frações (Intervenção #5), ou uma combinação de duas destas intervenções.

Em 40% dos edifícios aplicou-se a Intervenção #1, em 17% a Intervenção #5, em 9% as Intervenções #1 e #5, em 4% as intervenções #1 e #3 e, em 3% a Intervenção #3 (Figura 13).

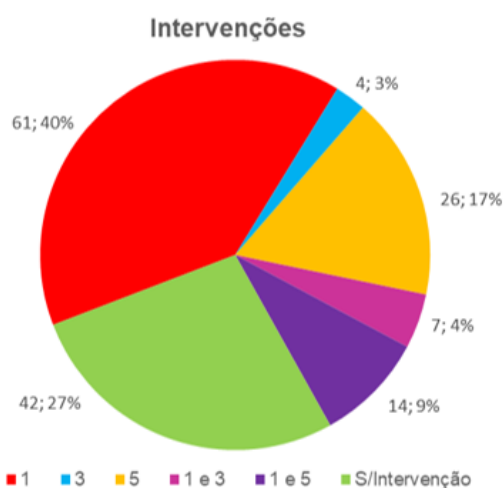
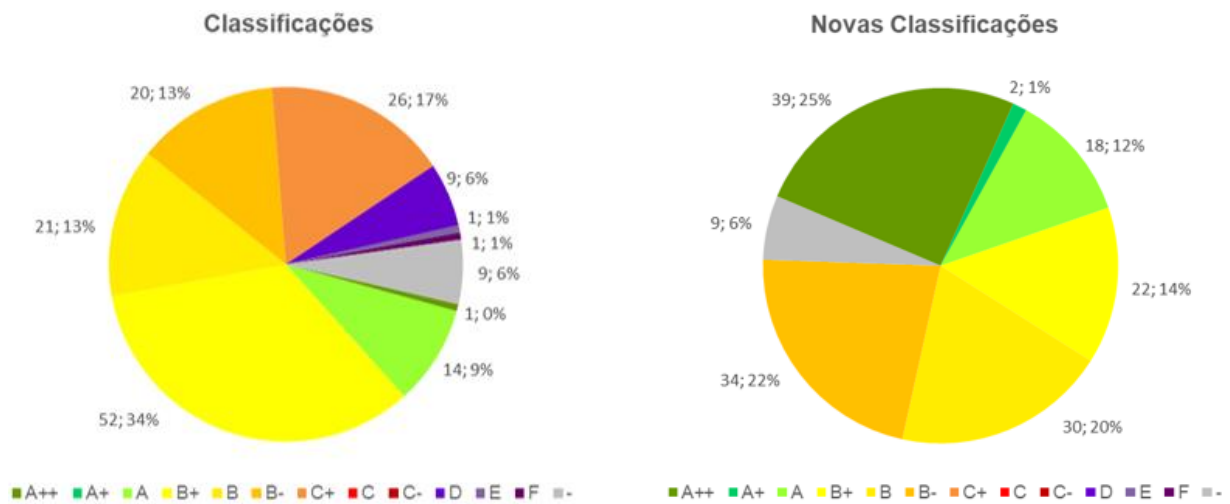


Figura 13: Intervenções aplicadas no edificado analisado

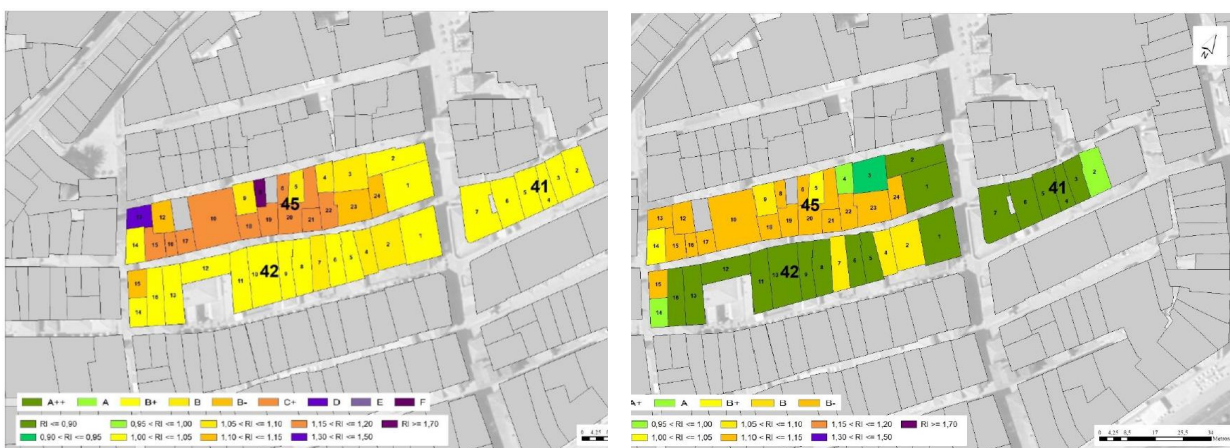
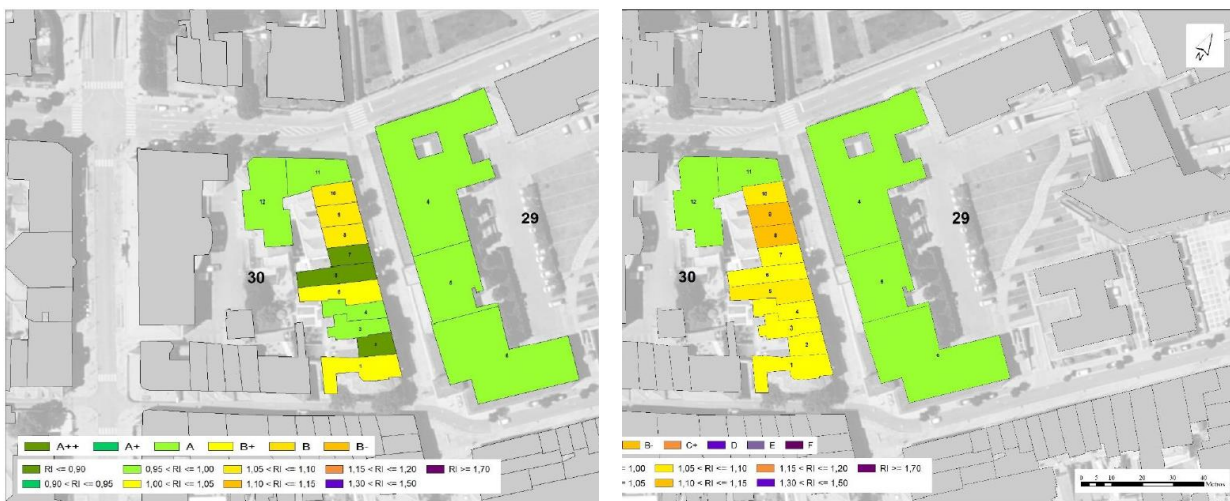
Mostra-se nas Figuras 14 e 15, respetivamente, as Classificações de Risco de Incêndio antes e depois das intervenções de todo o edificado estudado. É de notar que deixaram de existir as piores classes de Risco de Incêndio – Médio, Elevado, Muito Elevado e Iminente -, que correspondiam a 25% dos edifícios estudados, passando a haver apenas as classes Muito Baixo, Baixo, Aceitável e Pequeno. Assim, o CHVC tornar-se-ia, através desta potencial implementação de medidas mitigadoras do RI, mais seguro em termos incêndio nos seus edifícios.



Figuras 14 e 15: Classificações dos edifícios estudados antes e após as intervenções

Mapas de Risco de Incêndio

Através da Análise de Risco efetuada foram feitos Mapas de Risco de Incêndio (Figuras 16 a 23) para cada setor do CHVC, onde se pode comparar facilmente a melhoria na classificação devido à implementação das intervenções.





Figuras 20 e 21: Mapas RI dos edifícios analisados da zona Charlie – antes e após a implementação das intervenções



Figuras 22 e 23: Mapas RI dos edifícios analisados da zona Delta – antes e após a implementação das intervenções

Classificação de Risco de Incêndio

Foi ainda feito um esforço de reflexão para analisar como seria possível criar uma classificação para o Risco de Incêndio de todo um quarteirão atendendo a uma potencial gestão da malha urbana.

A primeira hipótese envolvia fazer a média de todos os edifícios de um quarteirão, mas iria tirar valor ao perigo gerado por um mau edifício no meio de muitos potenciais bons. Um edifício de classificação F no meio de muitos A iria “desaparecer” e seria errado considerar o quarteirão com a classificação de RI A. Apenas um edifício em más condições de conservação e de alto RI, no meio de muitos bons, na eventualidade de ocorrer um incêndio, irá impactar negativamente todos os edifícios que estejam na sua vizinhança, mesmo que todos eles tenham boas condições de separação e proteção contra incêndio no edifício em causa.

Assim, foi elaborada uma proposta inicial de classificação de RI para quarteirões de Centros Históricos consistindo na média ponderada dos piores 10% de cada quarteirão. Excluem-se os edifícios em obras ou devolutos.

Para os onze quarteirões estudados compararam-se os valores de RI para cada um dos métodos de cálculo (100% dos edifícios e os 10% piores), e definiram-se as classificações de RI de cada quarteirão (Tabela 2).

Tabela 2: Classificação de Risco de Incêndio dos quarteirões estudados

Quarteirão	Quantidade de edifícios		Média Valores		Classificação
	Existentes	Usados no cálculo	100%	10%	
29	5	0,5	0.95	1.00	A
30	19	1,9	1.04	1.13	B-
41	6	0,6	1.04	1.05	B+
42	15	1,5	1.04	1.11	B
45	22	2,2	1.17	1.61	E
77	4	0,4	1.27	1.48	D
78	28	2,8	1.15	1.50	D
79	14	1,4	1.10	1.16	C+
80	14	1,4	1.06	1.16	C+
83	52	5,2	1.05	1.17	C+
94	21	2,1	1.35	1.54	E

Conclusão

A representação da Análise de Risco de Incêndio dum centro histórico, podendo ser gráfica através duma representação georreferenciada, é muito útil para se obter/definir uma estratégia de gestão no que se refere à Segurança Contra Incêndio em Edifícios;

O Centro Histórico de Viana do Castelo apresenta valores positivos nesta análise ao seu risco de incêndio, considerando que apenas 20% a 40% dos edifícios estudados necessitam de melhorias a nível de risco de incêndio;

Uma ferramenta como o modelo CHICHORRO ajuda a definir de forma simplificada as medidas de segurança ativa e passiva a serem implementadas em reabilitação, quer numa análise individual ou coletiva de edifícios numa malha urbana;

A recolha e o processamento dos dados para a realização duma Análise de Risco de Incêndio são facilitados ao serem usadas ferramentas de Sistemas de Informação Geográfica como as usadas pela Câmara Municipal de Viana do Castelo.

Referências

- [1] INE, *Censos 2011 Resultados Definitivos - Portugal*.
- [2] Câmara Municipal de Viana do Castelo, *Área de Reabilitação Urbana do Centro Histórico de Viana do Castelo – Memória Descritiva e Justificativa*. Viana do Castelo, julho 2013.
- [3] *Aviso nº 9320/2013, Diário da República N.º 138, 2ª Série*. 19/07/2013.
- [4] Câmara Municipal de Viana do Castelo, *De Companhia da Bomba a Companhia de Bombeiros Sapadores Viana do Castelo – 240 anos 1780-2020*, Viana do Castelo, (2020).
- [5] ARICA:2019 – LNEC, <http://www.lnec.pt/pt/servicos/ferramentas/br-arica-2019/>, julho 2022.
- [6] CHICHORRO, <https://paginas.fe.up.pt/~chichorro/>, julho 2022
- [7] Martins, D., *Avaliação de risco de incêndio com o método chichorro – caso de estudo Ribeira/Barredo*. Porto, julho 2015.
- [8] Martins, A., *Avaliação Georreferenciada do Risco de Incêndio do Centro Histórico de Viana do Castelo*. Porto, junho 2021.

Otimização de Envidraçados Termocrómicos para um Clima Mediterrânico

GONÇALO Araújo^{1,a}, HENRIQUETA Teixeira^{2,b}, GOMES M. Glória^{2,c}, e RODRIGUES A. Moret^{2,d}

¹IN+/Técnico Lisboa, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001, Lisboa, Portugal

² CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos (DECivil), Técnico Lisboa, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco pais, 1049-001, Lisboa, Portugal

^agoncalo.r.araujo@tecnico.ulisboa.pt, ^bhenriqueta.teixeira@tecnico.ulisboa.pt,

^cmaria.gloria.gomes@tecnico.ulisboa.pt, ^dmoret.rodriques@tecnico.ulisboa.pt

Palavras-chave: Envidraçado Termocrómico, Simulação energética, Otimização.

Resumo. Os envidraçados de edifícios são responsáveis por perdas e ganhos térmicos significativos, sendo que a investigação corrente tem convergido para encontrar soluções de envidraçados que minimizem as necessidades energéticas de aquecimento, arrefecimento e iluminação. Um exemplo de vidros inovadores que tem vindo a emergir é o dos vidros termocrómicos, que alteram as suas propriedades óticas de transmitância e reflectância de acordo com a temperatura que atingem. O presente estudo analisa o impacto que a temperatura de transição e a respetiva transmitância do vidro têm nas necessidades energéticas para atingir o conforto térmico e lumínico de um gabinete com envidraçado orientado a sudeste em Lisboa, Portugal. Esta análise é realizada através da simulação horária das necessidades de aquecimento e arrefecimento, assim como da luminosidade do gabinete, para o período de um ano climático, considerando um vidro termocrómico corrente. Em paralelo, desenvolve-se um processo de otimização para minimizar as necessidades energéticas de climatização e iluminação do gabinete. As variáveis de decisão deste processo consistem em coeficientes de uma regressão linear que descreve a temperatura de transição e os respetivos valores de transmitância. Os resultados obtidos demonstram uma natureza antagónica entre o desempenho lumínico e térmico dos vidros termocrómicos. Por fim, determinam-se os intervalos da temperatura de transição e respetivos valores de transmitância dos vidros termocrómicos que melhor satisfazem os critérios de desempenho para o gabinete em estudo.

Introdução

Os edifícios são responsáveis por cerca de 40% do consumo energético total na Europa [1] e, atendendo ao crescimento urbano que se vem verificando [2], a necessidade de reduzir este consumo é de extrema importância. Para atingir este objetivo, vários estudos têm vindo a focar-se em diversas áreas e fases de desenvolvimento do edifício, desde o projeto até à sua construção e escolha de materiais construtivos [3], [4]. No que toca aos componentes do edifício, os envidraçados têm um grande impacto nas condições de conforto e desempenho energético do mesmo. A sua principal função é possibilitar visão para o exterior e transmitir luz natural para o interior, limitando assim o uso de iluminação artificial. No entanto, são também responsáveis por perdas térmicas significativas, o que prejudica o comportamento térmico do edifício [5]. Este comportamento tem motivado os investigadores a estudar e melhorar o desempenho de envidraçados para reduzir consumos energéticos. Recentemente, diversas tecnologias de envidraçados inteligentes têm emergido e demonstrado bons resultados na melhoria do desempenho energético de edifícios [6]. Uma tecnologia particularmente promissora diz respeito aos Envidraçados Termocrómicos (ETC). Os ETC são uma solução de envidraçado inteligente passiva que consiste na integração de uma camada composta por um material de mudança de fase (PCM)

entre dois panos de vidro. Os PCM são capazes de mudar as suas propriedades óticas e térmicas de acordo com a sua temperatura de superfície, escurecendo quando atinge temperaturas mais elevadas [7].

O PCM geralmente usado para constituir esta camada é o Óxido de Vanádio (VO_2). Este material transita de semiconductor para metal através de um processo de histerese quando atinge uma temperatura de transição (T_c) de 68°C [8]. Infelizmente, a T_c do VO_2 é consideravelmente mais alta do que as temperaturas de uso corrente em matéria de conforto, quer exteriores quer interiores. Para resolver este problema, os fabricantes adicionam outros materiais ao VO_2 para alterar a sua T_c e transmitâncias solar (τ_{sol}) e visível (τ_{vis}), de maneira a obter propriedades adequadas que providenciem melhorias no consumo energético [6]–[9]. Estas alterações às propriedades do VO_2 devem variar de acordo com o clima onde os envidraçados são aplicados, visto que climas quentes requerem, por exemplo, T_c mais altas do que climas frios [9]–[13]. Como tal, para os ETC influenciarem positivamente o consumo energético dos edifícios onde são aplicados, devem apresentar propriedades adequadas ao clima local. O número de estudos encontrados na literatura que investigam o impacto que a T_c , τ_{sol} e τ_{vis} têm nos consumos energéticos de edifícios com ETC é relativamente limitado [14]–[16]. Na Figura 1 mostram-se hipóteses de modelação teórica da fase de transição de vidros termocrómicos (histerese) para $T_c=35^\circ\text{C}$, utilizadas em estudos de simulação [16]. Os resultados dos estudos mostram que, tendencialmente, rápidas transições do estado do material, com menores T_c , representam maiores poupanças energéticas.

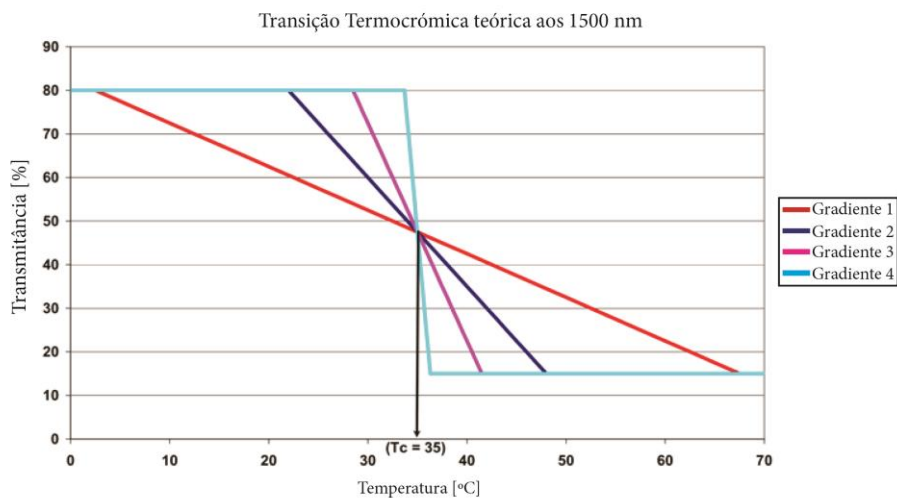


Figura 1: Histereses teóricas usadas para modelar diferentes ETC com uma temperatura de transição de 35°C (Adaptado de Warwick et al. [16]).

Muitos dos estudos que investigam ETC consideram ambas as necessidades energéticas de climatização (aquecimento e arrefecimento) e de iluminação de um espaço. Contudo, também reportam que a diminuição da temperatura de transição para o estado mais escuro de um ETC acaba por influenciar negativamente os consumos energéticos de iluminação, apesar de melhorar o desempenho térmico [11], [13]. Desta forma, a redução das necessidades energéticas para conforto térmico obtida por transições do ETC a temperaturas menores pode acabar por não compensar o aumento das necessidades energéticas de iluminação do espaço. Estes conflitos indicam que, ao se produzir e aplicar ETC em diferentes climas, devem considerar-se propriedades adequadas de um ETC como a T_c e o grau de histerese do material termocrómico, assim como as suas propriedades τ_{sol} e τ_{vis} . A identificação deste conflito e a obtenção das propriedades ótimas de um ETC que providenciem os melhores consumos energéticos pode então ser tratado como um problema de otimização.

O processo de otimização é tipicamente aplicado na indústria com o intuito de encontrar o melhor conjunto de variáveis que gera o mínimo ou o máximo valor de uma função objetivo. Na área do desempenho de edifícios, estes objetivos são geralmente traduzidos por índices de desempenho que são resultados de funções matemáticas extensas e demoradas, calculadas por softwares de simulação [17], [18]. Estes problemas de otimização, que englobam simulações

computacionais demoradas, são tipicamente abordados através de otimizações sem derivada (ou estocástica), devido á falta de conhecimento prévio das expressões matemáticas aplicadas. Uma classe de algoritmos que tem vindo a ser aplicada neste tipo de otimização, com resultados positivos em simulações energéticas, é a classe das metaheurísticas [19]–[21].

O presente estudo procura identificar o conflito existente entre necessidades energéticas de climatização e de iluminação associadas à utilização de um ETC e obter as propriedades ótimas que produzam o melhor desempenho energético para um caso de estudo de um gabinete de um edifício de escritórios em Lisboa. Para isso, este estudo integra um processo de otimização das propriedades de um ETC (T_c , espectro de temperaturas de mudança de τ_{sol} e τ_{vis} , e os seus respetivos valores) com o algoritmo de otimização genética (GA) para obter o menor consumo energético na climatização do gabinete e averiguar o seu impacto nas necessidades energéticas de iluminação. Em complemento, é realizado um segundo processo de otimização, mas desta vez com o objetivo de minimizar o consumo energético total, incluindo climatização e iluminação do gabinete. Este processo é desenvolvido com recurso a um software de simulação energética amplamente validado (EnergyPlus [22]), num ambiente de programação Python [23], [24]. Finalmente, comparam-se os resultados obtidos, quantifica-se a melhoria obtida face ao mesmo caso de estudo com um ETC comercializado não otimizado, tecem-se conclusões, e elaboram-se possíveis melhorias a efetuar no desenvolvimento de um ETC adaptado ao clima local.

Metodologia

A metodologia deste estudo é dividida em dois subcapítulos: (1) Caso de estudo e Simulação, e (2) Otimização. Não subcapítulo (1), apresenta-se o caso de estudo e clima considerado para a simulação. Mais concretamente, reportam-se as propriedades do ETC aplicado no caso de estudo, parâmetros introduzidos na simulação, e resultados obtidos. No subcapítulo (2) define-se o problema de otimização, concebe-se a integração das variáveis a otimizar num ambiente iterativo de simulação energética do caso de estudo, e estabelece-se a função objetivo do problema.

Caso de Estudo e Simulação. Este estudo tem como base um estudo prévio [13] onde se considera um gabinete de escritório orientado a sudeste em Lisboa, Portugal. O clima português é caracterizado como mediterrânico quente (Figura 2) [25]. O gabinete apresenta cerca de 20 m² de área útil de pavimento e 10 m² de área envidraçada. O envidraçado é composto do lado exterior por um vidro ETC (12 mm), caixa de ar (12 mm), e no interior por um vidro de baixa emissividade (6mm). A Tabela 1 descreve as propriedades óticas e térmicas do vidro ETC para diferentes temperaturas. É possível verificar que τ_{sol} e τ_{vis} são as propriedades que sofrem as maiores alterações ao longo deste espectro de temperaturas, com os seus valores a variarem, respetivamente, entre 0.69 e 0.26, e entre 0.72 e 0.02 para valores crescentes de temperatura. Como τ_{vis} tem uma variação até 0.02, o ETC escurece quase totalmente e impede a luz natural de iluminar o gabinete.

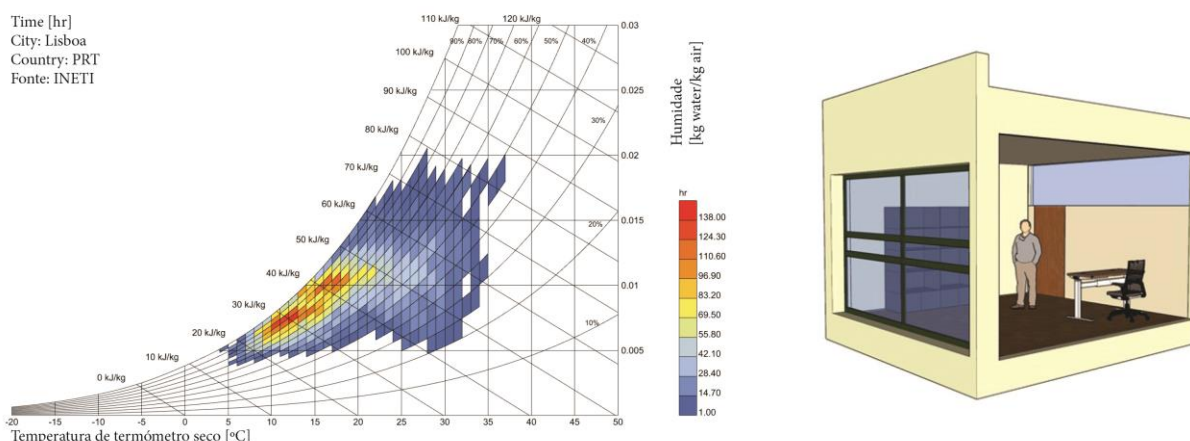


Figura 2: Gráfico psicrométrico para Lisboa, Portugal, e modelo 3D do Gabinete em estudo.

Tabela 1: Propriedades do ETC integradas na simulação.

Temperatura [°C]	5	15	25	45	65	85
U [W/(m ² K)]	1.6					
τ_{vis}	0.72	0.69	0.63	0.36	0.11	0.02
ρ_{visF}	0.07	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04
ρ_{visB}	0.07	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04
τ_{sol}	0.69	0.67	0.64	0.50	0.34	0.26
ρ_{solF}	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05
ρ_{solB}	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05

Para obter a taxa energética total para climatização e iluminação foi efetuada uma simulação inicial com o ETC original, de acordo com o modelo energético pré-calibrado com resultados experimentais, tal como descrito em [13]. A Tabela 2 apresenta os parâmetros que foram considerados na simulação, para além dos dados geométricos do gabinete. O gabinete foi modelado com a ocupação de 1 pessoa, durante um horário laboral típico. O equipamento elétrico considerado é composto por um posto de trabalho com computador e portátil. Os pontos sensores colocados para a simulação em ambiente EnergyPlus encontram-se localizados no plano de trabalho, à altura da secretária, e ativados para o período de um ano. Para além disso, considerou-se que as luzes ligam quando o sensor atinge um valor limite ≤ 500 lux, e que o equipamento HVAC trabalha para manter a temperatura entre 20°C e 24°C, com um SCOP/SEER de 4.43/7.98.

A simulação demora 20 segundos a completar, e os seus resultados são apresentados na forma de potência energética horária [W] para aquecimento, arrefecimento, e iluminação, cujos valores são depois convertidos em energia final afetados pelo SCOP/SEER no caso da climatização. De acordo com os resultados da simulação (Figura 3), o gabinete atinge máximos horários para climatização de 300 W, e para iluminação de 110W. Finalmente, o consumo energético anual é de 9.70 kWh/m² para climatização (aquecimento e arrefecimento) e de 3.01 kWh/m² para iluminação, perfazendo o conjunto dos dois consumos o valor total de 12.71 kWh/m².

Tabela 2: Parâmetros e outputs da simulação.

Ocupação	1 pessoa, das 9 às 18.
Renovação de ar/hora	1.0 h ⁻¹
Equipamentos elétricos [W]	Computador: 155, durante ocupação. Portátil: 30, durante ocupação.
Iluminação artificial [W]	110W, durante ocupação.
Controlos de iluminação [lux]	Abaixo dos 500 lux
Controlos de climatização [°C]	20-24 °C, durante ocupação.
SCOP/SEER	4.43/7.98
Período de simulação	30 intervalos por hora, durante 1 ano.
Resultados [W]	Taxa energética total para aquecimento; Taxa energética total para arrefecimento; Taxa energética total para iluminação

Otimização. Como demonstrado anteriormente, os ETC devem possuir propriedades óticas e térmicas específicas adaptadas a cada clima [13] e, como tal, deve também alterar-se a sua fabricação para obter propriedades diferentes que respondam a necessidades energéticas previstas. Neste caso, a otimização é elaborada para um clima mediterrânico quente [25].

O presente estudo procura otimizar as propriedades de um ETC para obter o melhor desempenho energético possível, e identificar os conflitos existentes entre as necessidades energéticas de iluminação, e de climatização ao longo deste processo. Para isso, serão realizados dois processos de otimização com o objetivo de: (1) minimizar as necessidades energéticas anuais para climatização do espaço, e verificar qual o impacto nas necessidades de iluminação (que se prevê que aumentem) (Eq.1); (2) minimizar as necessidades energéticas anuais totais, resultado composto pela soma das necessidades de iluminação e climatização (Eq.2). Para descrever o processo de histerese do ETC, e descrever as variáveis de decisão, elaborou-se uma função que aproxima os valores das propriedades τ_{sol} e τ_{vis} de acordo com diferentes valores de temperatura (T) da superfície do ETC (Eq.3). Esta função descreve uma variação linear entre valores máximos (τ_{max}) e mínimos (τ_{min}) variáveis de τ_{sol} e τ_{vis} (τ_{min} de τ_{vis} é 0.02 em todas as situações) de acordo com uma temperatura

mínima (T_{min}) a partir da qual o ETC começa a escurecer, e com uma temperatura máxima (T_{max}) a partir da qual o ETC atinge o seu estado final.

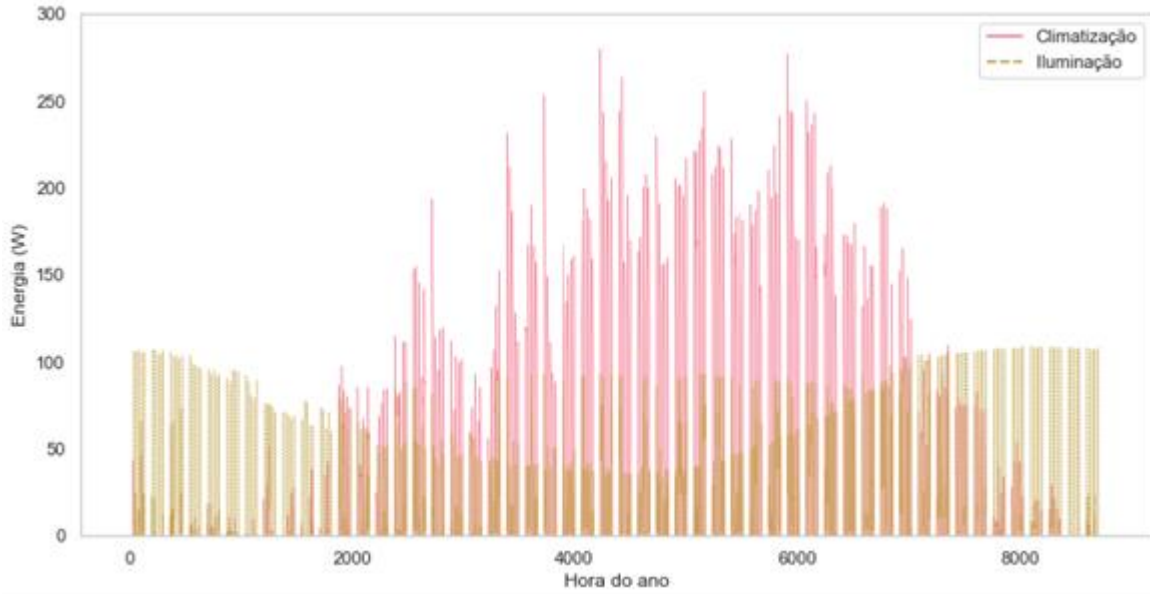


Figura 3: Potência energética horária durante um ano para climatização e iluminação do espaço com o ETC original.

As temperaturas (T) consideradas para o cálculo dos valores de τ_{sol} e τ_{vis} foram 5, 15, 25, 45, 65, e 85°C, e considerou-se que T_{max} , e T_{min} poderiam variar entre 0 e 95°C, e τ_{max} , e τ_{min} entre 0.10 e 0.90. Para além disso, integraram-se duas condições no processo, que estabelecem que T_{min} e τ_{min} não poderiam ser maiores que T_{max} , e τ_{max} , respetivamente (Eq.4). A Figura 4 apresenta as propriedades τ_{sol} e τ_{vis} em função da temperatura T para o ETC original e com as suas propriedades aproximadas para simulação. Finalmente, com a simulação da função de aproximação das propriedades do ETC (Eq.3) obtêm-se erros de aproximação no valor de 0.50% na simulação para as necessidades energéticas anuais para climatização (9.65 kWh/m² face a 9.70 kWh/m² do ETC original), e de 2.99% para as necessidades energéticas anuais para iluminação (3.1 kWh/m² face a 3.01 kWh/m² do ETC original). Para efetuar o processo de otimização, optou-se pelo algoritmo genético (GA) da classe das metaheurísticas ([26], [27]), que efetuou 200 iterações para cada objetivo (Eq.1 e Eq.2), d um total de 4400 segundos a completar cada processo.

$$f_1(T_{min}, T_{max}, \tau_{max}, \tau_{min}) = \min (Climatização) kWh / m^2 . \quad (1)$$

$$f_2(T_{min}, T_{max}, \tau_{max}, \tau_{min}) = \min (Climatização + Iluminação) kWh / m^2 . \quad (2)$$

$$\tau(T_{min}, T_{max}, \tau_{max}, \tau_{min}) = \begin{cases} \tau_{max}, & T \leq T_{min} \\ \tau_{max} - \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{(T_{max} - T_{min})} \times (T - T_{min}), & T_{min} < T < T_{max} \\ \tau_{min}, & T \geq T_{max} \end{cases} . \quad (3)$$

$$\begin{cases} T_{max} - T_{min} > 0 \\ \tau_{max} - \tau_{min} > 0 \end{cases} . \quad (4)$$

$$T \in \{5, 15, 25, 45, 65, 85\}, \quad T_{min} \in [0, 95], \quad T_{max} \in [0, 95], \quad \tau_{max} \in [0.1, 0.9], \quad \tau_{min} \in [0.1, 0.9]$$

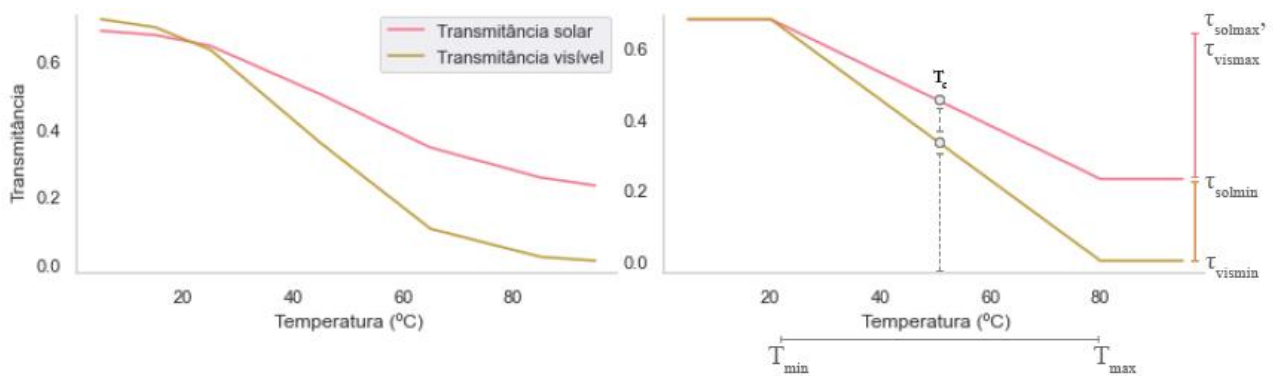


Figura 4: Comparação das propriedades τ_{sol} e τ_{vis} aproximadas ao longo da temperatura (Eq.3) com o ETC original descrito na Tabela 1 (esquerda).

Resultados e Discussão

Os resultados dos dois processos de otimização são ilustrados na Figura 5. Para f_1 , pode-se observar que as necessidades energéticas para climatização baixam significativamente ao longo das iterações. Contudo, as necessidades de iluminação aumentam drasticamente, acabando por ultrapassar as necessidades energéticas e provocar um aumento gradual das necessidades totais. Em contraste, para f_2 , as necessidades energéticas para climatização aumentam ligeiramente, e as necessidades de iluminação e totais diminuem ao longo das iterações. A análise desta figura confirma o conflito entre as necessidades de climatização e iluminação para a otimização de um ETC, confirmando que otimizar um ETC com o objetivo de minimizar um tipo de consumo, acaba por prejudicar o outro. Finalmente, ambas as otimizações não atingiram convergência ao encontrar a solução ótima, tendo sido interrompidos pelo número máximo de 200 iterações imposto ao algoritmo devido a limites de tempo computacional.

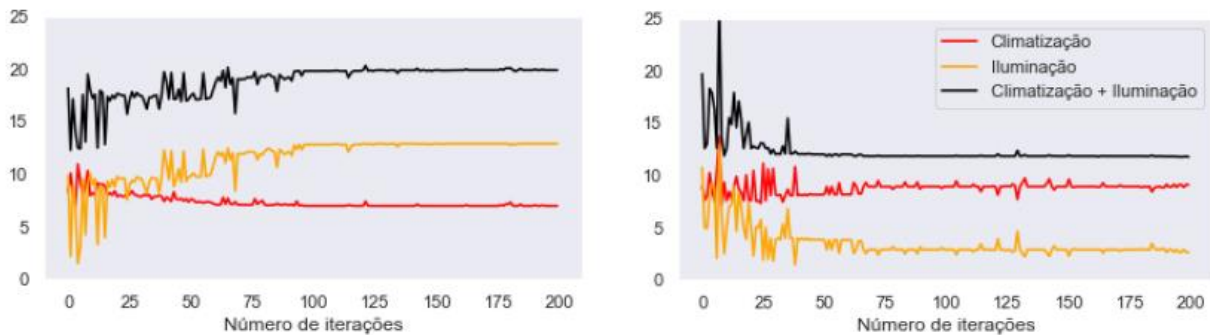


Figura 5: Resultados das necessidades energéticas para climatização e iluminação ao longo das iterações dos processos de otimização (Esquerda – f_1 , Direita – f_2).

As propriedades τ_{sol} e τ_{vis} das soluções ótimas encontradas para cada otimização (Eq.1 e Eq.2) são mostradas na Figura 6. As necessidades energéticas de climatização mínimas são encontradas pelo GA para um ETC ótimo com $\tau_{max} \approx 0.67$, que inicia a sua transição rápida e brusca a partir de $\approx 5.40^\circ\text{C}$ até $\approx 14.55^\circ\text{C}$, atingindo depois os valores de $\tau_{min} \approx 0.10$ e 0.02 para τ_{sol} e τ_{vis} , respetivamente. Como tal, transições de estado dos ETC mais rápidas e a temperaturas mais baixas efetivamente melhoram o conforto térmico, mas, como visto, prejudicam as necessidades de iluminação. Por outro lado, a solução ótima encontrada para menores necessidades totais inicia a sua transição a partir de $\approx 54.33^\circ\text{C}$, até $\approx 90.09^\circ\text{C}$, com $\tau_{max} \approx 0.46$ e $\tau_{min} \approx 0.32$ e 0.02 para τ_{sol} e τ_{vis} , respetivamente.

Os resultados obtidos pelas soluções ótimas encontradas para f_1 e f_2 (Figura 7) demonstram as leituras acima. A solução ótima de f_1 apresenta necessidades de ≈ 6.99 e 12.91kWh/m^2 para climatização e iluminação respetivamente, enquanto a solução ótima de f_2 apresenta necessidades de ≈ 9.12 e 2.67kWh/m^2 . Face ao original, a solução de f_1 apresenta uma melhoria de $\approx 28\%$ das

necessidades de climatização e um agravamento de $\approx 330\%$ das necessidades de iluminação. A solução de f_2 apresenta uma melhoria de $\approx 6\%$ e 11% , respetivamente.

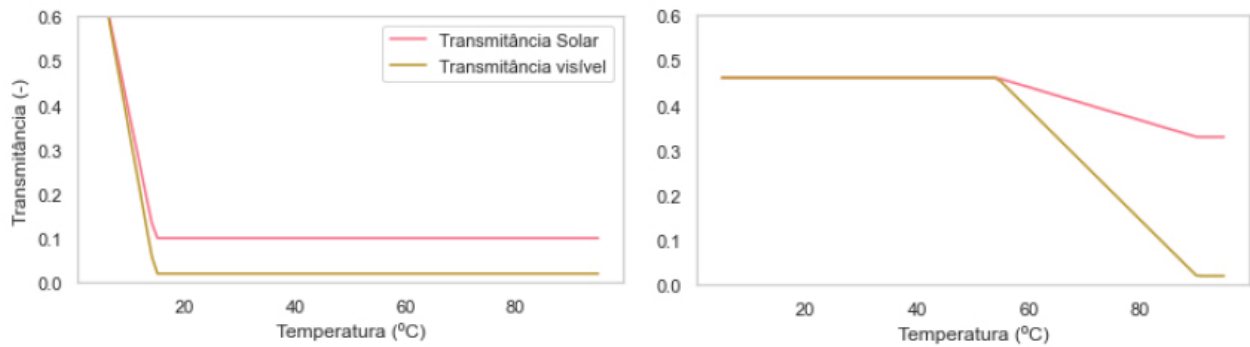


Figura 6: Soluções ótimas obtidas pelo algoritmo genético para f_1 (esquerda), e f_2 (direita).

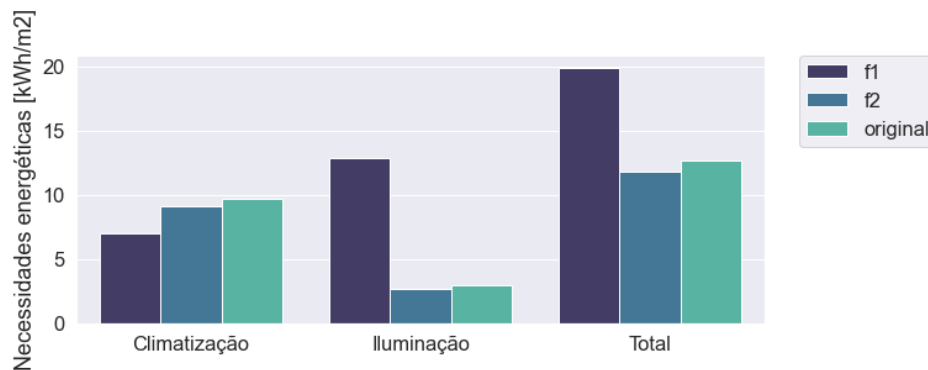


Figura 7: Comparação das necessidades energéticas entre a solução ETC ótima para cada objetivo e a ETC original.

Em resumo, observou-se que ambos os processos de otimização não convergiram totalmente, sendo necessário mais tempo computacional para efetuar mais simulações com o algoritmo e encontrar melhores resultados. Uma abordagem para solucionar este problema poderia ser a elaboração de modelos preditivos com base em técnicas de inteligência artificial capazes de estimar computacionalmente resultados aproximados de uma simulação, mas em tempos computacionais significativamente mais baixos ([18], [24], [28]), permitindo assim a realização de mais iterações num processo de otimização.

Para além disso, a otimização com um único objetivo composto pela soma das partes não aparenta ser a melhor solução, pois o algoritmo acaba por explorar espaços de solução indiscriminadamente, sem procurar o mínimo de ambas as partes, apenas o total. Duas possíveis soluções seriam a atribuição de rácios que representem o peso de cada objetivo na sua soma, ou a integração de um algoritmo de otimização multiobjectivo, para se calcular a frente de Pareto do problema e encontrar várias soluções mínimas possíveis que satisfaçam o conflito entre objetivos [29], [30].

Conclusões

O presente estudo incidiu na otimização das propriedades de um ETC de forma a alcançar o melhor desempenho energético de um gabinete de escritório situado num clima mediterrânico quente. Como tal, procurou-se encontrar a melhor combinação de temperaturas máximas e mínimas onde ocorre a histerese do ETC, assim como os valores de transmitância máxima e mínima entre os quais o ETC varia. A literatura indica que, geralmente, uma menor temperatura de transição e um processo de histerese acentuado e rápido conduzem a melhores resultados. No entanto, muitos estudos não consideram as necessidades energéticas de iluminação que resultam de um escurecimento do envidraçado rápido e em temperaturas baixas, considerando apenas as melhorias térmicas. Neste estudo efetuaram-se dois processos de otimização com objetivos diferentes: (1) para minimizar as necessidades energéticas totais anuais para climatização, e (2) para minimizar as

necessidades energéticas totais anuais para climatização e iluminação. Com isto, procurou-se não só otimizar o ETC, mas também ilustrar os conflitos existentes entre desempenho lumínico e térmico de um gabinete com esta solução de envidraçado.

Os resultados obtidos para (1) mostram uma redução, face ao ETC original, de $\approx 28\%$ nas necessidades energéticas de climatização, e um aumento de $\approx 330\%$ para as necessidades de iluminação. Este aumento significativo das necessidades energéticas de iluminação, que chega até a ultrapassar as necessidades energéticas de climatização após algumas iterações da otimização, demonstra a natureza conflituosa entre ambos os objetivos, e a necessidade de se encontrar uma solução equilibrada específica do clima, que não comprometa ambas as componentes (climatização e iluminação). Os resultados obtidos para (2) demonstram uma melhoria de 7.3% face ao ETC original e um maior equilíbrio entre necessidades de iluminação e climatização, apresentando uma melhoria de $\approx 6\%$ e $\approx 11\%$, respetivamente. Contudo, a otimização final do objetivo (2) não convergiu após as 200 iterações, o que indica que o algoritmo necessitaria de mais iterações e, conseqüentemente, mais tempo computacional, para obter melhores resultados. Para além disso, como o processo de otimização (2) engloba a soma das necessidades de iluminação e climatização, o algoritmo não tem qualquer controlo sobre o desempenho lumínico ou térmico do gabinete, procurando apenas otimizar a soma das partes.

Alguns problemas identificados neste estudo foram: (i) o tempo de simulação elevado para concluir as simulações; (ii) o número de iterações relativamente reduzido para o número de casos possíveis; (iii) O objetivo final de minimização das necessidades totais, composto pela soma das necessidades de iluminação e climatização. Para resolver os problemas (i) e (ii) propõe-se como trabalho futuro a elaboração de um modelo de previsão baseado em técnicas de inteligência artificial [18] que permita obter os resultados das simulações num tempo significativamente mais rápido, permitindo assim realizar mais iterações. Para resolver o problema (iii), propõe-se a integração de um algoritmo que efetue otimização multiobjectivo, considerando assim dois objetivos na otimização em simultâneo: Necessidades mínimas de iluminação e climatização.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por fundos internacionais através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) com a referência POCI-01-0247-FEDER-045919. Os autores desejam expressar o seu agradecimento à unidade de investigação CERIS do IST-ID, Associação do Instituto Superior Técnico para a Investigação e Desenvolvimento e à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo financiamento da unidade de investigação CERIS (UIDB/04625/2020) e das bolsas de doutoramento 2021.04849.BD e PD/BD/150576/2020.

Referências

- [1] European Commission, Making our homes and buildings fit for a greener future, no. July, p. 3, [Online], https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/pt/fs_21_3673 (2021).
- [2] United Nations, *The World's Cities in 2018*, [Online]. https://www.un.org/en/development/desa/population/publications/pdf/urbanization/the_worlds_cities_in_2018_data_booklet.pdf, (2018).
- [3] P. Berrill, E. J. H. Wilson, J. L. Reyna, A. D. Fontanini, and E. G. Hertwich, *Decarbonization pathways for the residential sector in the United States*, *Nat. Clim. Chang.*, 12, no. 8 (2022) 712–718, doi: 10.1038/s41558-022-01429-y.
- [4] W. J. Cole *et al.*, *Quantifying the challenge of reaching a 100% renewable energy power system for the United States*, *Joule*, 5, no. 7 (2021) 1732–1748, doi: 10.1016/j.joule.2021.05.011.
- [5] H. Ye, X. Meng, and B. Xu, *Theoretical discussions of perfect window, ideal near infrared solar spectrum regulating window and current thermochromic window*, *Energy Build.*, 49

(2012) 164–172, doi: 10.1016/j.enbuild.2012.02.011.

- [6] E. Cuce and S. B. Riffat, *A state-of-the-art review on innovative glazing technologies*, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 41 (2015) 695–714, doi: 10.1016/j.rser.2014.08.084.
- [7] S. D. Rezaei, S. Shannigrahi, and S. Ramakrishna, *A review of conventional, advanced, and smart glazing technologies and materials for improving indoor environment*, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 159 (2017) 26–51, doi: 10.1016/j.solmat.2016.08.026.
- [8] M. H. Lee, *Thermochromic glazing of windows with better luminous solar transmittance*, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 71, no. 4 (2002) 537–540, doi: 10.1016/S0927-0248(01)00135-0.
- [9] M. Saeli, C. Piccirillo, I. P. Parkin, R. Binions, and I. Ridley, *Energy modelling studies of thermochromic glazing*, *Energy Build.*, 42, no. 10 (2010) 1666–1673, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.04.010.
- [10] M. Aburas, V. Soebarto, T. Williamson, R. Liang, H. Ebendorff-Heidepriem, and Y. Wu, *Thermochromic smart window technologies for building application: A review*, *Appl. Energy*, 255, no. June, (2019) 113522, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113522.
- [11] R. Liang, Y. Wu, and R. Wilson, *Thermal and Visual Comfort Analysis of an Office With Thermochromic Smart Windows Applied*, *Infoscience.Epfl.Ch*, [Online]. https://infoscience.epfl.ch/record/213310/files/2_LIANG.pdf, (2015).
- [12] R. Tällberg, B. P. Jelle, R. Loonen, T. Gao, and M. Hamdy, *Comparison of the energy saving potential of adaptive and controllable smart windows: A state-of-the-art review and simulation studies of thermochromic, photochromic and electrochromic technologies*, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 200, no. February (2019) 109828, doi: 10.1016/j.solmat.2019.02.041.
- [13] H. Teixeira, M. Glória Gomes, A. Moret Rodrigues, and D. Aelenei, *Assessment of the visual, thermal and energy performance of static vs thermochromic double-glazing under different European climates*, *Build. Environ.*, 217, no. February (2022) 109115, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109115.
- [14] L. Giovannini, F. Favoino, A. Pellegrino, V. R. M. Lo Verso, V. Serra, and M. Zinzi, *Thermochromic glazing performance: From component experimental characterisation to whole building performance evaluation*, *Appl. Energy*, 251, no. February (2019) 113335, doi: 10.1016/j.apenergy.2019.113335.
- [15] M. E. A. Warwick, I. Ridley, and R. Binions, *The effect of variation in the transition hysteresis width and gradient in thermochromic glazing systems*, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, 140, no. June (2015) 253–265, doi: 10.1016/j.solmat.2015.04.022.
- [16] M. E. A. Warwick, I. Ridley, and R. Binions, *The effect of transition gradient in thermochromic glazing systems*, *Energy Build.*, 77 (2014) 80–90, doi: 10.1016/j.enbuild.2014.03.044.
- [17] A. Nguyen, S. Reiter, and P. Rigo, *A review on simulation-based optimization methods applied to building performance analysis*, *Appl. Energy*, 113 (2014) 1043–1058, doi: 10.1016/j.apenergy.2013.08.061.
- [18] T. Wortmann, A. Costa, G. Nannicini, and T. Schroeffer, *Advantages of surrogate models for architectural design optimization*, *Artificial Intell. Eng. Des. , Anal. Manuf.*, 29, no. 4 (2015) 471–481, doi: 10.1017/S0890060415000451.
- [19] G. Araújo, I. Pereira, A. Leitão, and M. Correia Guedes, *Conflicts in passive building performance: Retrofit and regulation of informal neighbourhoods*, *Front. Archit. Res.*, (2021), doi: 10.1016/j.foar.2021.02.007.
- [20] C. Waibel, T. Wortmann, R. Evins, and J. Carmeliet, *Building energy optimization: An*

extensive benchmark of global search algorithms, Energy Build., 187 (2019) 218–240, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.01.048.

- [21] I. Pereira, C. Belém, and A. Leitão, Escaping evolution, In Proceedings of the 25th International Conference of the Association for Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA) 2020, 1 (2020) 295–304.
- [22] B. Drury, O. Curtis, K. Linda, and C. Frederick, *EnergyPlus : Energy simulation program*, ASHRAE J., 42, no. April (2000) 49–56.
- [23] S. Philip, eppy Documentation, Github Repository, no. Release 0.5.52. 2019, <https://github.com/santoshphilip/eppy>.
- [24] G. Araujo, L. Santos, A. Leitão, and R. Gomes, *Ad based surrogate models for simulation and optimization of large urban areas*, (2022).
- [25] M. C. Peel, B. L. Finlayson, and T. A. McMahon, *Updated world map of the Koppen-Geiger climate classificatio*, Hydrol. earth Syst. Sci., 11, no. 5 (2007) 1633–1644.
- [26] J. Khazaii, Genetic ALgorithm Optimization, In Advanced Decision Making for HVAC Engineers, Springer, Cham, (2016) 87–97.
- [27] T. Bäck and H.-P. Schwefel, *An Overview of Evolutionary Algorithms for Parameter Optimization*, Evol. Comput., 1, no. 1 (1993) 1–23, doi: 10.1162/evco.1993.1.1.1.
- [28] E. Thrampoulidis, G. Mavromatidis, A. Lucchi, and K. Orehounig, *A machine learning-based surrogate model to approximate optimal building retrofit solutions*, Appl. Energy, 281 (2021) 116024, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.116024.
- [29] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*, IEEE Trans. Evol. Comput., 6, no. 2 (2002) 182–197, doi: 10.1109/4235.996017.
- [30] Y. Censor, *Pareto optimality in multiobjective problems*, Appl. Math. Optim., 4, no. 1 (1977) 41–59, doi: 10.1007/BF01442131.

Impacto de estratégias de aquecimento nos sistemas de construção LSF: avaliação do conforto térmico e desempenho energético

ALMEIDA Ricardo^{1,2,a}, VICENTE Romeu^{3,b}, FIGUEIREDO António^{3,c} e FIGUEIREDO Mário^{3,d}

¹ CONSTRUCT, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n; 4200-465 Porto, Portugal

² Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Viseu, Campus Politécnico, 3504-510 Viseu, Portugal

³ RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro

^aralmeida@estgv.ipv.pt, ^bromvic@ua.pt, ^cajfigueiredo@ua.pt, ^dmariosf@ua.pt

Palavras-chave: *Light Steel Framing*, Campanha Experimental, Inércia Térmica, Estratégias de Aquecimento, Conforto térmico, Desempenho energético.

Resumo. A importância de compatibilizar um bom desempenho térmico com uma elevada eficiência energética é um desafio relevante e atual nos edifícios residenciais. Nos países do sul da Europa, o recurso aos sistemas de aquecimento é, muitas vezes, condicionado, por um fenómeno designado por pobreza energética. Neste contexto, o desafio de procurar soluções construtivas sustentáveis, que otimizem o desempenho térmico dos edifícios, é ainda mais premente.

O sistema construtivo em aço enformado a frio, *Light Steel Framing* (LSF), tem vindo a ocupar uma posição mais relevante no mercado e de forma crescente. No entanto, a utilização destes sistemas é ainda questionada devido à sua fraca inércia térmica. Este estudo pretende contribuir para a compreensão do comportamento térmico e do desempenho energético de edifícios em LSF localizados em climas mediterrâneos. Para apoiar este trabalho, utilizam-se duas células de teste, uma composta por materiais tradicionais (construção em betão armado e alvenaria) e uma segunda composta por construção em aço enformado a frio. Foi comparado o desempenho das duas células de teste no período de inverno, considerando-se diferentes estratégias de aquecimento (contínuo e intermitente), procurando-se assim analisar os hábitos reais de aquecimento da população, neste caso de estudo, portuguesa. A monitorização inclui a medição da temperatura do ar interior e do consumo de energia para aquecimento.

Na sequência deste trabalho, pretende-se contribuir para uma melhor compreensão do desempenho térmico e energético dos edifícios em aço enformado a frio quando comparados com edifícios de construção tradicional, bem como na capacidade destes de proporcionarem um ambiente confortável de forma mais económica e mais sustentável.

Introdução

Segundo a Organização Mundial de Saúde, a população das sociedades modernas passa aproximadamente 90% do seu tempo no interior dos edifícios, sendo que 2/3 desse tempo é passado na própria habitação [1]. Adicionalmente, os edifícios residenciais ganharam igualmente novos requisitos que têm vindo progressivamente a evoluir, não apenas como locais de habitação, mas também como zonas de trabalho profissional.

O sector residencial é responsável por uma parte muito significativa do consumo energético na União Europeia (UE), tendo este sector representado aproximadamente 27% do total do consumo de energia em 2020. Salienta-se que desse consumo, 62.8% destina-se a colmatar as necessidades de aquecimento das habitações [2]. Estas percentagens justificam a crescente consciencialização sobre

a importância de encontrar novas soluções construtivas sustentáveis, que satisfaçam as necessidades de conforto, promovendo a eficiência energética dos edifícios.

Nos países do sul da Europa, pela sua especificidade climática (verões secos e invernos amenos e húmidos), contexto económico (rendimentos baixos e elevado custo energético) e cultural (hábitos e comportamentos) [3], a prática de aquecimento contínuo não é recorrente, sendo o aquecimento intermitente a prática mais comum dentro das habitações residenciais. Desta forma, é importante entender-se a influência e eficiência dessas práticas em diferentes tipologias construtivas, nomeadamente comparando o desempenho térmico e energético da construção corrente em betão armado e alvenaria, com as soluções designadas de construção ligeira ou leve, que emergem no setor dos edifícios.

O uso de materiais e componentes de construção pesados com capacidade de armazenamento de calor, tais como betão armado e alvenaria, conduzem a soluções com uma forte inércia térmica, soluções essas que há muito estão presentes no edificado residencial do sul da Europa [4]. Este hábito construtivo nasce da necessidade de manter as habitações com uma reduzida amplitude térmica. Sendo os países do sul da Europa caracterizado por variações de temperatura diária e sazonal consideráveis, estes sistemas construtivos tendencialmente apresentarão um melhor desempenho. Por outras palavras, a forte inércia térmica destas construções permite uma temperatura interior mais estável, sem utilização de fontes de aquecimento ou arrefecimento, resultando num maior conforto térmico interior.

No entanto, o setor dos edifícios tem vindo a passar por uma mudança de paradigma, face ao surgimento de novas tecnologias construtivas. Assim, alternativas mais industrializadas e ligeiras têm ganho quota no mercado da indústria da construção, mostrando abordagens diferentes para satisfazer as necessidades humanas (sociais, económicas e culturais). O sistema construtivo de perfis em aço enformado a frio, tipicamente designado como *Light Steel Framing*, é um bom exemplo que tem vindo a ganhar notoriedade na indústria da construção, mostrando que consegue oferecer vantagens em relação ao sistema construtivo convencional [5].

Motivado pelo crescimento das soluções em aço enformado a frio nos países do sul da Europa, este trabalho pretende discutir as oportunidades e limitações deste sistema construtivo em termos de desempenho térmico e energético, tendo em conta diferentes estratégias de aquecimento (aquecimento contínuo e/ou intermitente). Assim, é avaliada a influência do padrão de aquecimento, intermitente ou contínuo, através de uma campanha de monitorização de condições ambientais interiores e consumo energético em duas células de teste. O período de monitorização decorreu durante a estação de aquecimento, sendo uma célula representativa da construção corrente em betão e alvenaria (designada de HBM) e a outra representativa da construção leve em aço enformado a frio (designada de LSF).

Metodologia

Células de teste. As células de teste localizam-se em Albergaria-a-Velha, no distrito de Aveiro (região centro litoral de Portugal, com latitude 40°41'22.70"N, longitude 8°31'2.49"W, e 113 m de elevação). Esta região, segundo a classificação de Köppen-Geiger [6], é caracterizada por um verão quente, pertencendo ao grupo Csb.

As células de teste encontram orientadas pelo seu lado de maior dimensão, com uma direção aproximada à linha norte-sul (155° SE). Não existem elementos de sombreamento a sul e poente que possam implicar perturbações ou incertezas nos resultados, existindo um alinhamento de árvores na zona norte às mesmas. Adicionalmente, a implementação das células de teste foi projetada de modo a não existir sombreamento de uma sobre a outra. A Figura 1 apresenta a implantação das células de teste através de imagem satélite e apresenta também uma fotografia com vista principal do alçado orientado a sul das mesmas.



Figura 1: Implantação das células de teste a) Imagem satélite; b) Fotografia das células de teste

A geometria das células de teste é regular, com dimensões internas em planta de 3,86 m por 2,97 m, resultando numa área de piso de aproximadamente 11,5 m². O pé-direito é de 2,7 m, resultando num volume interno de aproximadamente 31,0 m³. Para a definição do vão envidraçado foi realizada uma análise de sensibilidade com recurso ao programa *DesignBuilder*, tendo-se selecionado uma janela com 1,50 m², localizada no alçado sul.

Em termos construtivos, a célula à esquerda na Figura 1b) corresponde à solução em aço enformado a frio, enquanto a célula à direita corresponde à solução em betão armado e alvenaria, de modo a estabelecer uma referência para efeitos de comparação de desempenhos. As soluções adotadas para a cobertura e para as paredes exteriores apresentam o mesmo coeficiente de transmissão térmica nos dois sistemas construtivos, permitindo assim, a comparação direta do seu desempenho térmico. A caracterização construtiva detalhada das células de teste pode ser consultada em [7].

Monitorização. Para se caracterizar o comportamento térmico e o desempenho energético das duas células de teste, foi utilizado um conjunto de sensores para medir a temperatura e a humidade relativa (quatro sensores distribuídos junto ao pavimento e dois ao nível do teto, em cada uma das células de teste). Os sensores utilizados apresentam uma precisão de $\pm 0,2$ °C e $\pm 2,0$ %, para a medição da temperatura e da humidade relativa, respetivamente.

Em cada célula de teste está ainda instalado um sensor de temperatura junto ao centro geométrico, que funciona como referência para o *setpoint* do sistema aquecimento. O *setpoint* estabelecido é de 18,0 °C, tendo o mesmo um intervalo de acionamento de 0,5 °C, o que significa que o sistema liga quando a temperatura do ar interior desce abaixo dos 17,5 °C, e desliga quando a temperatura atinge os 18,5 °C (dentro do horário definido para o período de aquecimento). O consumo de energia para aquecimento é monitorizado através de um medidor de consumo elétrico com funcionamento de *data logger*. O clima exterior foi monitorizado através de sensores termo higrómetros e de um piranómetro. A Figura 2 apresenta uma representação esquemática da instrumentação.

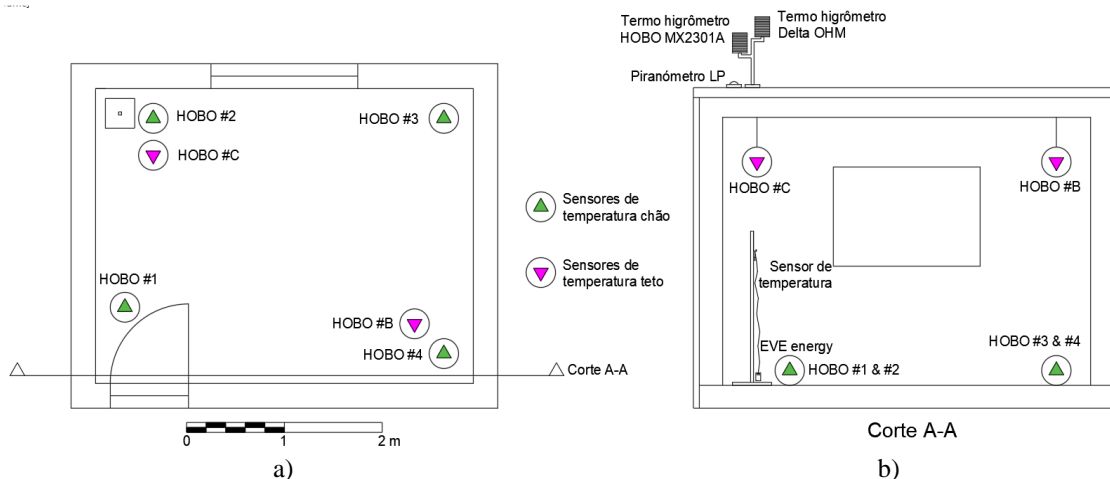


Figura 2: Distribuição da instrumentação na célula de teste. a) Vista em planta; b) Vista em corte

Ganhos internos. O efeito dos ganhos internos foi simulado considerando-se as recomendações da norma ISO 13790 [8], que, em contexto de edifícios residenciais, refere três períodos de ganhos internos num ciclo diário: das 23h às 7h, com um ganho de 2 W/m²; das 7h às 17h, com um ganho de 8 W/m²; e das 17h às 23h, com um ganho de 20 W/m². Aplicando esta recomendação à dimensão das células de teste (11,5 m²), resulta num ganho de calor de 23 W, 92 W e 230 W, para cada um dos períodos referidos. Este efeito foi considerado através de lâmpadas de aquecimento, que por disponibilidade de potências de lâmpadas comerciais, ajustaram-se estes valores, resultando assim o perfil de ganhos internos representado na Figura 3.

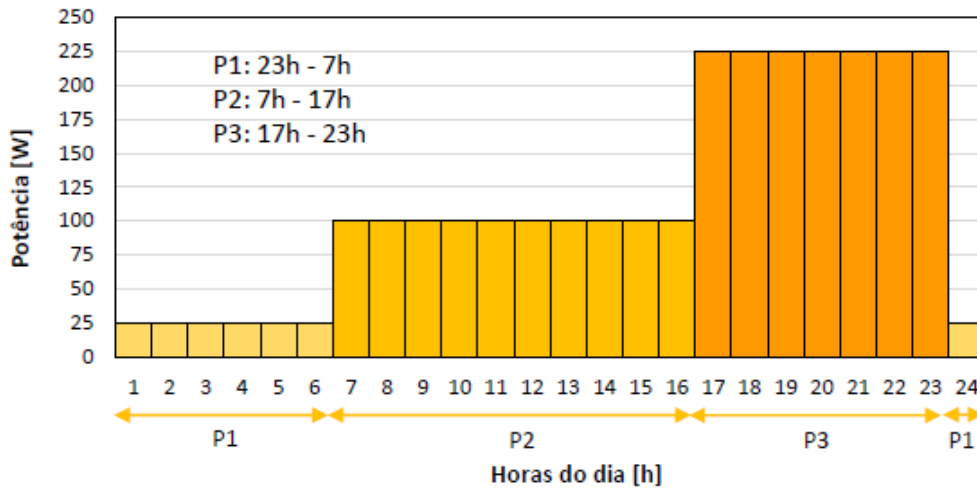


Figura 3: Perfil de ganhos internos

Perfis de aquecimento. Para o aquecimento das células de teste foram instaladas no seu interior cinco lâmpadas de aquecimento (1 x 25 W, 1 x 75 W, 1 x 150 W e 2 x 200 W), perfazendo uma potência máxima de 650 W. Para avaliar a influência do padrão de aquecimento, foram definidos quatro perfis de aquecimento: perfil A, aquecimento das 20 às 23h; perfil B, aquecimento das 17 às 23h; perfil C, aquecimento das 17 às 7h; e perfil D, aquecimento contínuo (Figura 4). Os perfis foram consecutivamente aplicados ao longo de sete dias, tendo-se repetido o ciclo três vezes. A duração total do ensaio foi de aproximadamente quatro meses.

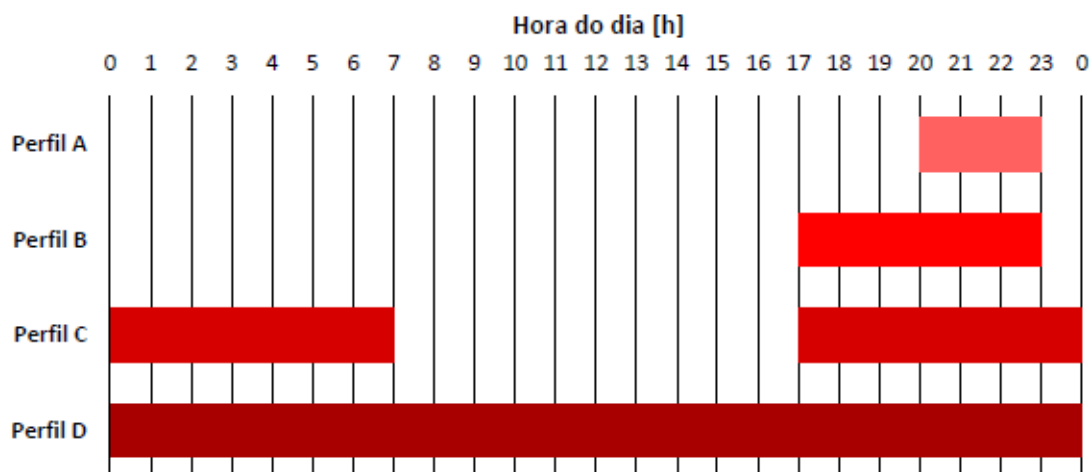


Figura 4: Perfis de aquecimento

Resultados

Temperatura exterior. As temperaturas do ar exterior registadas durante o período de medição estão sintetizadas na Figura 5, separadamente para cada mês.

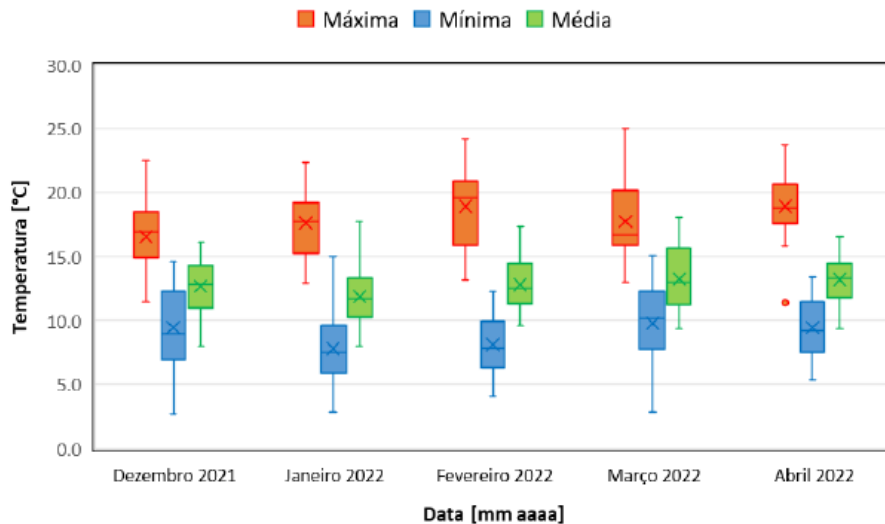


Figura 5: Temperatura exterior máxima, mínima e média para o período de estudo.

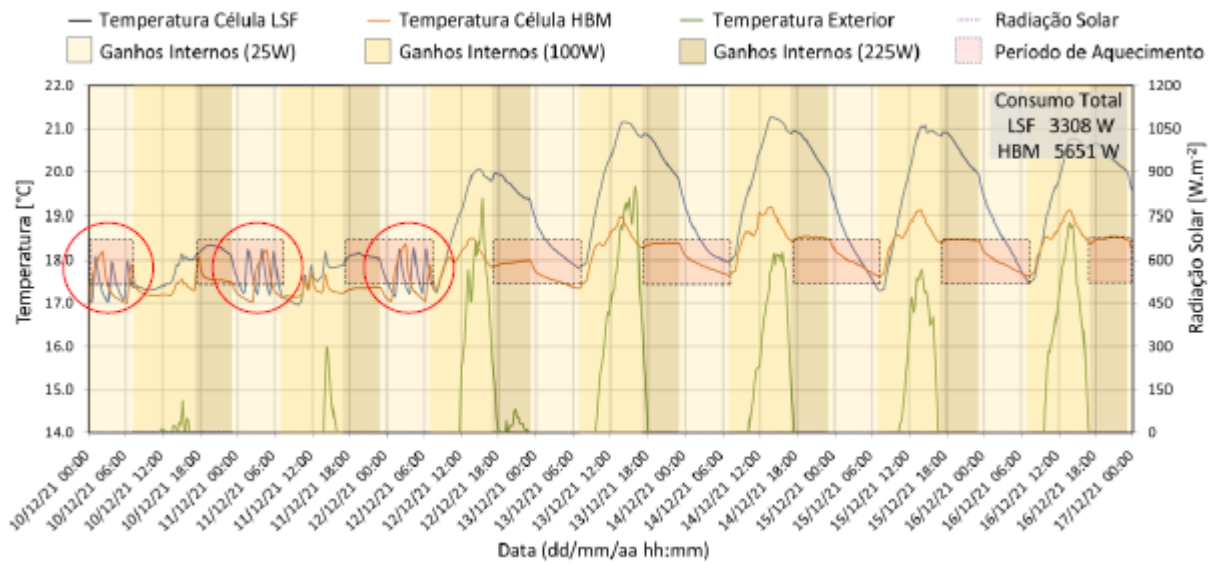
Dos resultados é possível concluir que, durante o período de ensaio, a temperatura exterior foi particularmente amena, com poucos períodos de temperaturas baixas, resultando em reduzidas necessidades de aquecimento das células de teste. Registaram-se vários períodos em que a temperatura exterior foi superior à temperatura interior estabelecida como *setpoint* do sistema de aquecimento.

Temperatura interior e consumo de energia. A título de exemplo, a Figura 6 apresenta detalhadamente os resultados obtidos em três semanas de ensaio com o perfil de aquecimento C (17h-7h). Nessa figura representam-se as variações da temperatura do ar no interior das duas células de teste (LSF e HBM), os registos da temperatura do ar exterior e da radiação solar, bem como a indicação dos períodos em que são considerados os ganhos internos e os períodos em que funcionou o sistema de aquecimento.

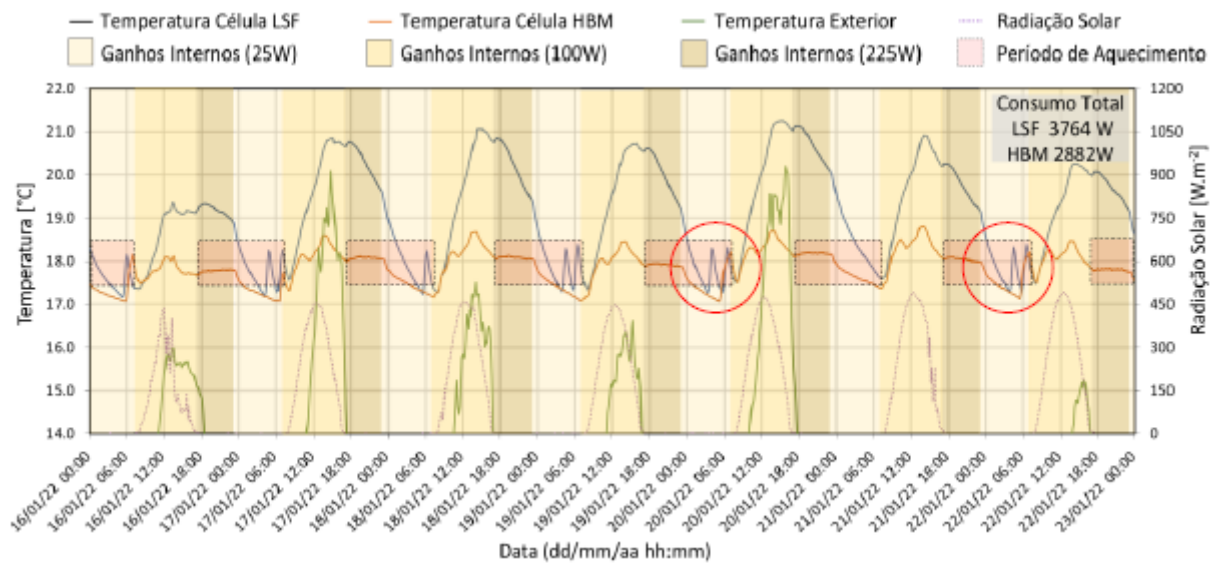
Nos três primeiros dias da segunda semana de ensaios (Figura 6a)), é possível observar que na célula de teste HBM o sistema de aquecimento apenas iniciou uma vez, enquanto na célula de teste em LSF arrancou três vezes (nº de picos no registo da temperatura). No entanto, a célula de HBM necessitou de mais tempo para atingir o valor de temperatura interior desejado, levando a um maior consumo energético face à célula de LSF, que atingiu mais rapidamente a temperatura desejada. Na Figura 6b) é possível observar ocorrências semelhantes, com mais arranques do sistema na célula em LSF. Refira-se ainda, que a célula de HBM conseguiu manter uma temperatura interior confortável durante a maioria do período de aquecimento, ligando o aquecimento apenas no final do mesmo, resultando assim numa diminuição do consumo energético. No acumulado dessa semana, a célula em LSF apresentou um consumo mais elevado do a célula HBM, ao contrário do que havia sucedido na primeira semana de ensaio.

Assim, realizou-se mais uma semana de medição (Figura 6c)). No entanto, o clima exterior foi bastante temperado, resultando num consumo de energia muito residual em ambas as células de teste.

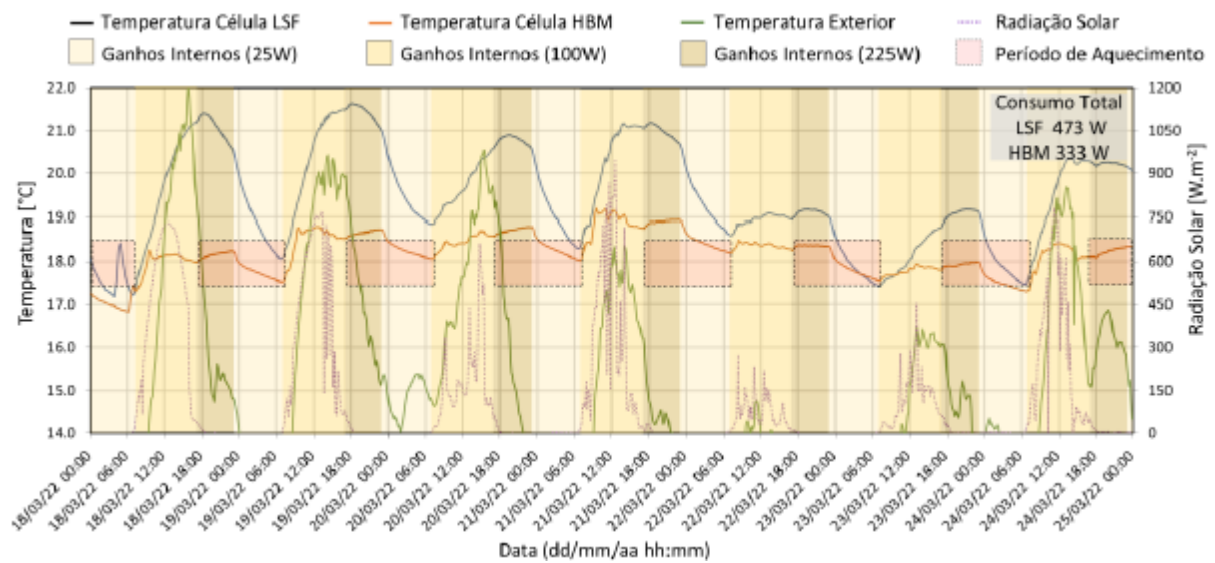
Síntese. A Figura 7 mostra todos os resultados obtidos durante as semanas de medição, separadamente para cada perfil de aquecimento. A Figura 8 sintetiza os resultados, incluindo a informação relativa aos graus hora de aquecimento (HDH – *heating degree hours*) e à temperatura média diária exterior (TMDe) das diferentes semanas de ensaio.



a)



b)



c)

Figura 6: Temperatura do ar no interior nas células de teste e condições ambientais externas durante uma semana com perfil de aquecimento C. a) PA#C_2ªsem (17-7h); b) PA#C_6ªsem (17-7h); c) PA#C_14ªsem (17-7h)

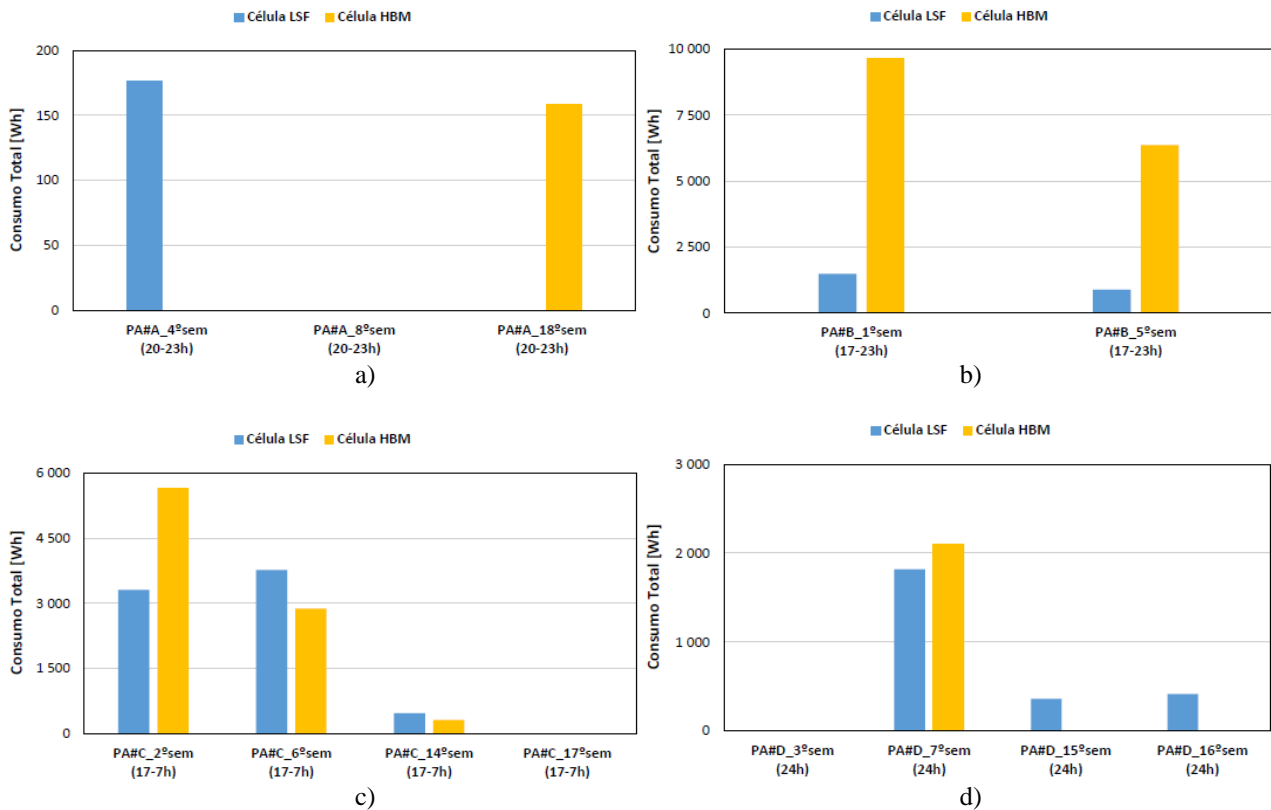


Figura 7: Consumo total de energia de cada semana de teste para o perfil de aquecimento: a) A; b) B; c) C; d) D

Perfil de Aquecimento	Semana	HDH (°C)	TMDe (°C)	Consumo Energético total [W]	
				LSF	HBM
PA#A (20-23h) 3h de aquecimento	4ª	807	13.4	176	0
	8ª	1002	12.2	0	0
	18ª	948	12.4	0	159
PA#B (17-23h) 6h de aquecimento	1ª	1303	10.1	1486	9664
	5ª	1132	11.3	893	6373
PA#C (17-7h) 14h de aquecimento	2ª	934	12.5	3308	5651
	6ª	1134	11.3	3764	2882
	14ª	581	14.8	473	323
	17ª	718	13.9	0	0
PA#D (24h) 24h de aquecimento	3ª	641	14.2	0	0
	7ª	950	12.4	1819	2093
	15ª	743	13.9	360	0
	16ª	913	12.6	414	0

Figura 8: Consumos totais, graus hora de aquecimento (HDH) e temperatura média diária exterior (TMDe)

É possível observável que as semanas que necessitaram de um maior consumo de energia foram aquelas que apresentaram um índice de HDH superior a 1000 °C e uma TMDe inferior a 12 °C, ocorrendo a diminuição da necessidade de aquecimento para temperaturas exteriores superiores. Estas circunstâncias coincidiram com o perfil de aquecimento B (6h de aquecimento intermitente, das 17 às 23h), tendo a célula de teste em LSF apresentado um desempenho energético significativamente melhor do que o desempenho observado na célula HBM.

No entanto, a variabilidade encontrada nos restantes períodos de ensaio, não permitem estender esta conclusão para outras condições de fronteira, sendo necessário mais investigação neste domínio.

Conclusões

Neste trabalho são apresentados os resultados de uma extensa campanha de monitorização do comportamento térmico e do desempenho energético de duas células de teste, uma representativa da

construção corrente em betão e alvenaria (HBM) e a outra representativa da construção leve em aço enformado a frio (LSF). Este trabalho teve como objetivo avaliar a influência do padrão de aquecimento, intermitente ou contínuo em edifício de carácter residencial. A análise dos resultados, permitiu as seguintes conclusões:

- o clima moderado de Albergaria-a-Velha condicionou maiores amplitudes nos resultados, ocorrendo vários períodos em que não foi necessário ligar o sistema de aquecimento para garantir a temperatura interior de 18;0 °C (*setpoint* definido para o arranque dos sistemas);
- o perfil de aquecimento conduz a diferentes respostas por parte das soluções construtivas. Perfis de aquecimento de menor duração, nomeadamente o perfil B (17-23h), resultaram num consumo energético cerca de sete vezes inferior na solução em LSF, comparativamente ao sistema construtivo em HBM. Este resultado confirma que as soluções leves apresentam uma resposta quase imediata ao sistema de aquecimento, apontando para um desempenho interessante e promissor num contexto de aquecimento intermitente;
- a variabilidade encontrada nos resultados, não permite conclusões definitivas, sendo necessário mais investigação neste domínio, nomeadamente através de uma nova campanha de monitorização em que seja reduzido o número de perfis de aquecimento analisados, mas prolongando-se a sua duração para minimizar os impactos do clima exterior.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por:

Financiamento Base - UIDB/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT - Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC);

Financiamento Base - UIDB/04450/2020 da Unidade de Investigação RISCO – *Risks and Sustainability in Construction* – financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC).

Este trabalho teve ainda o suporte financeiro e técnico da empresa Perfisa – Fábrica de Perfis Metálicos, S.A.

Referências

- [1] A. Dimosthenis and A. Sarigiannis, *Combined or multiple exposure to health stressors in indoor built environments*, World Health Organization Rep. Eur., no. October, (2014) 82.
- [2] Council of the European Union, *Your Key to European Statistics*, Eurostat, 2020. <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/-/ddn-20220617-1>.
- [3] S.A.M. Barbosa, *Comparação do índice de desconforto passivo com a classe energética de edifícios de habitação reabilitados do sul da europa*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil apresentada à Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, (2020).
- [4] G. Evola, L. Marletta, S. Natarajan, and E. Maria Patanè, *Thermal inertia of heavyweight traditional buildings: Experimental measurements and simulated scenarios*, Energy Procedia, 133 (2017) 42–52, doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.369.
- [5] E. Roque, R. Vicente, and R.M.S.F. Almeida, *Opportunities of Light Steel Framing towards thermal comfort in southern European climates: Long-term monitoring and comparison with the heavyweight construction*, Building and Environment, 200 (2021), doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107937.
- [6] M. Kotteck, J. Grieser, C. Beck, B. Rudolf, and F. Rubel, *World map of the Köppen-Geiger climate classification updated*, Meteorol. Zeitschrift, 15, no. 3 (2006) 259–263, doi: 10.1127/0941-2948/2006/0130.

- [7] E. Roque, *Indoor Thermal Comfort and Energy Performance of Residential Light Steel Framing Buildings*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil apresentada à Universidade de Aveiro, (2021).
- [8] ISO 13790:2008. *Energy performance of buildings - Calculation of energy use for space heating and cooling*, International Organization for Standardization, Geneve, Switzerland.

CAPÍTULO 3

TECNOLOGIAS CONSTRUTIVAS

Propriedades de betão drenante em misturas com agregados reciclados

XIMENES José^{1,a*}, UHER Vojtech^{2,b}, JESUS Carlos de^{1,b}, AGUIAR José^{1,c} e PAIS Jorge^{3,c}

¹ CTAC - Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

² Universidade de Tecnologia de Brno - Instituto de Tecnologia de Materiais de Construção e Componentes - Veveří 331/95, 602 00 Brno, República Checa

³ ISISE - Instituto de Sustentabilidade e Inovação em Engenharia Estrutural, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

^{a,1*} lebenei@yahoo.com, ^{a,2} cjesus@civil.uminho.pt, ^{a,3} aguiar@civil.uminho.pt,
^bvojtech.uher@vutbr.cz, ^cjpais@civil.uminho.pt

Palavras-chave: Betão permeável, porosidade, resistência, durabilidade

Resumo. O presente trabalho estuda o desenvolvimento de betão drenante para aplicação em pavimentos rodoviários, através do estudo das suas características físicas e mecânicas, apoiado numa campanha de ensaios laboratoriais, de várias composições.

Os materiais de pavimento rígido com betão drenante, após sua construção, sofrem um processo de degradação sob a ação do tráfego e das condições climáticas. Esse processo, que ocorre durante a vida útil do piso, pode ser mais lento se for bem construído e mantido. Assim, é fundamental que a caracterização mecânica do betão seja adequada para a sua aplicação. Assim, os ensaios de trabalhabilidade e densidade devem ser realizados em relação ao betão fresco. No caso do betão endurecido, são os ensaios de resistência à compressão e flexão, os ensaios de permeabilidade e os ensaios de resistência ao desgaste.

O betão permeável pode ser uma solução de segurança bem-sucedida para chuvas fortes e inundações cada vez mais frequentes. Este estudo teve como foco a obtenção de um betão permeável otimizado, dentro do escopo das normas internacionais, por meio da análise do betão feitos com as mesmas relações A/C e tempos de vibração e os diferentes percentuais de agregado reciclado. Os resultados mostram a forte influência de ambos os parâmetros sobre a distribuição de porosidade e permeabilidade e a influência negativa de porosidades mais altas sobre a resistência. O betão com relação de 0,35 W/C e tempo de vibração de 40 segundos e 30% de agregado reciclado foi selecionado por seu desempenho mecânico superior.

Introdução

Em relação aos agregados reciclados, tem sido feito um esforço para aumentar o conhecimento sobre este material, para encontrar uma forma mais adequada de o utilizar. A incorporação de materiais reciclados no betão tem sido uma forma de atingir esse objetivo, pois a cada ano são produzidas toneladas de RCD (resíduos de construção e demolição) para o desenvolvimento da cidade. Com base na prevenção ambiental, os RCD são reciclados para uso na construção de pisos. Neste caso são utilizados para pavimentação de estradas [1].

A necessidade de reaproveitar esses resíduos se mostra de extrema importância tanto para a esfera ambiental em que os impactos causados ao meio ambiente são amenizados, quanto por questões econômicas. Neste estudo, que analisa a viabilidade de reaproveitamento de resíduos de construção, observa-se que há uma garantia em relação aos parâmetros de sustentabilidade [2].

Os sistemas de betão permeável permitem a recarga natural das águas subterrâneas e deixam a água evaporar do subsolo [3,4]. Além disso, os benefícios do pavimento de betão permeável

incluem absorção acústica [5], diminuição do aquecimento superficial e efeito Ilha de Calor Urbano [6] e filtragem dos contaminantes na água [7].

Para reduzir os efeitos negativos das superfícies impermeáveis, o betão permeável surgiu como uma boa alternativa com sua estrutura porosa. Geralmente, o betão permeável possui baixa resistência devido à sua estrutura porosa, portanto seu uso em estradas de alto volume é muito limitado até ao momento. Muitos estudos têm sido realizados para aumentar a resistência mecânica do betão permeável. Existem basicamente dois métodos diferentes para aumentar a resistência do betão permeável. A primeira é aumentar a quantidade de ligante e a segunda é aumentar a resistência da pasta de cimento [8]. Em muitos estudos, agregados de menor tamanho têm sido usados para aumentar a resistência do betão permeável, aumentando a quantidade de ligante e verificou-se que a resistência mecânica aumenta com o uso de agregados de menor tamanho [8].

A permeabilidade prévia do betão varia de 11% a 35%, enquanto a porosidade varia de 15% a 25% [9]. A National Ready Mix Concrete Association (NRMCA) aponta um valor mínimo recomendado de porosidade de 15% [10].

O betão permeável proporciona vários benefícios ambientais importantes, como a redução do efeito de ilhas de calor urbanas, o reabastecimento de aquíferos e a redução efetiva do escoamento de águas pluviais [11].

Com grande importância e uso crescente em diferentes tipos de construção, os betões permeáveis são referenciados na Storm Water Technologies Fact Sheet Bioretention da United States Environmental Protection Agency para gerenciamento de escoamento de águas pluviais [12]. A resistência mecânica do betão permeável é inversamente proporcional à porosidade [13], ou seja, à medida que a porosidade aumenta, a resistência diminui. Portanto, é previsível uma variabilidade substancial em relação à resistência e desempenho estrutural, uma vez que ambos os parâmetros dependem diretamente da porosidade [14].

Sólidos avanços de conhecimento podem ser encontrados na literatura sobre o tema. Montes et al. [15] desenvolveram ensaios para determinar a porosidade, enquanto Zouaghi et al. [16] e Olek et al. [17] analisaram parâmetros mecânicos. O autor posterior [17] e Neithalath et al. [18] examinaram e caracterizaram os parâmetros acústicos do material.

Embora a porosidade seja amplamente aceite como um indicador de permeabilidade do pavimento, Neithalath et al. [18] demonstraram que outros parâmetros devem ser analisados para uma previsão precisa da permeabilidade.

Na literatura, para melhorar a qualidade dos agregados reciclados e o desempenho do betão agregado reciclado, destacam-se os três principais métodos técnicos: (i) remoção de argamassa de cimento residual [19 - 24], (ii) revestimento de agregados reciclados [25 - 30], (iii) métodos de mistura de betão em várias etapas com misturas pozolânicas [31 - 37]. Xuan et al. [38] relataram que o tratamento dos agregados reciclados por métodos de mistura de betão em várias etapas com aditivos pozolânicos é uma maneira eficiente e prática, em vez da remoção de argamassa velha aderida ou revestimento de agregados reciclados, que eram caros e demorados métodos com impactos ambientais secundários. Kisku et al. [37] investigaram as propriedades mecânicas do betão agregado reciclado produzido com diferentes métodos de mistura de betão.

Devido às suas várias vantagens, os pavimentos de betão são amplamente utilizados em todo o mundo [39]. Para projetar os pavimentos de betão, vários métodos de projeto [40 - 44], são usados em diferentes países. Na maioria dos guias de projeto [40, 41 e 43], a fadiga da laje de betão e a erosão do suporte da laje são dois casos de falha comuns considerados no projeto. O projeto é feito para determinar a espessura da laje necessária para resistir à aplicação repetida de cargas por eixo durante a vida útil do pavimento. Além disso, a resistência à flexão, o módulo de elasticidade e a densidade são as propriedades importantes do betão usadas para determinar a espessura necessária do pavimento. Uma vez que as propriedades dos agregados, usados para preparar as misturas em betão, têm um impacto importante nas propriedades do betão usado no projeto, os valores de espessura necessários podem alterar significativamente com base no tipo de agregado usado.

Alcançar uma proporção adequada entre poros e desempenho mecânico levará a um betão permeável otimizado projetado para atender a requisitos específicos de desempenho. Portanto, para

projetar um betão permeável otimizado utilizável em todos os locais com déficit de drenagem de água, é necessário conhecimento científico inovador relacionado à permeabilidade e distribuição de poros.

Assim, o objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um betão permeável apto a ser aplicado em pavimentos rodoviários de betão com incorporação de agregados reciclados. O desempenho do betão permeável será avaliado por: i) características do betão fresco sobre trabalhabilidade através dos ensaios de abaixamento e Vêbê, densidade do betão fresco e teor de vazios de ar; ii) ensaios de betão endurecido; permeabilidade, porosidade por imersão, resistência à compressão, resistência à tração, ensaio de resistência à flexão.

Materiais e metodologia

Materiais. Os betões permeáveis foram produzidos a partir de cimento, agregados finos e grossos, agregados reciclados e água. Os agregados foram produzidos por um processo específico para obtenção de grãos esféricos ou agregados arredondados (processo de base empírica), permitindo uma distribuição uniforme dos diferentes tamanhos de partículas no betão.

Considerando que o aumento da porosidade é acompanhado pela diminuição da resistência do betão permeável, a seleção do ligante é de vital importância. Foi utilizado cimento Portland (CEM I 42,5 R) [45], com as resistências à flexão e compressão tabela 1.

Tabela 1: Resistência do Cimento Portland CEM I 42,5 R [45]

Idade (dias)	Resistência (MPa)	
	Flexão	Compressão
2	5.6	31.8
7	7.5	47.0
28	8.5	55.5

Os agregados utilizados na produção do betão foram uma mistura de fino (Agregado 0/4 mm), e agregado grossos normal e reciclado (Agregado 4/10 mm e agregado 10/14 mm) que permitiu obter a distribuição granulométrica apresentada na Tabela 2 e Fig. 1, que segue as Especificações de Construção Portuguesas [46], e as propriedades dos agregados na Tabela 3.

Os betões permeáveis foram preparados para uma razão (A/C), respetivamente 0,30 e submetidos a tempos de vibração de 40 segundos. Com uma composição mostrada na tabela 4. Diferentes tipos dos provetes do ensaio de betão foram feitos. Para cada tipo de betão poroso foram confeccionados 9 provetes do ensaio cúbicos (150x150x150 mm), 9 (100x100x100 mm) e 9 prismáticos (100x100x400 mm), 4 (400x400x80 mm) e 4 (400x300x80 mm). O aspeto dos provetes do ensaio pode ser observado na fig. 2.

Tabela 2: Distribuição de tamanho de partícula agregado

Abertura da peneira (mm)	0.063	4	10	14	16
Passagem Cumulativa (%)	1,5	13,5	45,9	39,1	100

Tabela 3: Propriedades físicas do agregado

Propriedade	Unidades	Padrão	Agregados		
			0/4	4/10	10/14
Densidade	kg/m ³	EN 1097-6:2016 [47]	2670	2660	2620
Resistência à fragmentação agregado normal	%	EN 1097-2:2011 [48]	-	20.64	23.17
Densidade	kg/m ³	EN 1097-6:2016 [47]	2670	2273	2242
Resistência à fragmentação Reciclado RCD	%	EN 1097-2:2011 [48]	-	36.16	36.9

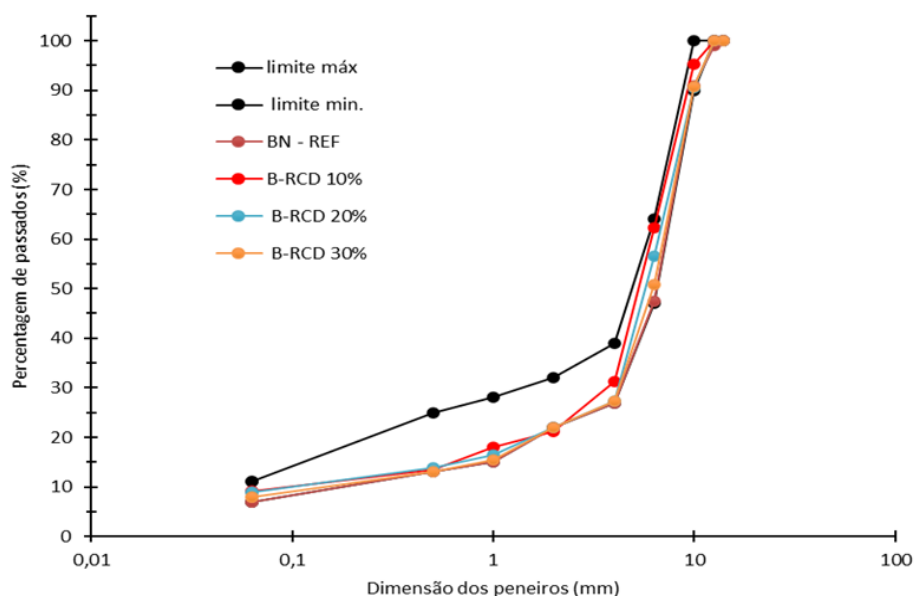


Figura 1: Distribuição granulométrica de agregados normais e reciclados no fuso de misturas drenantes PA 12.5 (BBd) Betão betuminoso drenante [46].

Tabela 4: Misturas de betão permeável

No. dos betões	Designação dos betões	Quantidade dos materiais (kg/m ³)				
		CEM I 42,6	Ag. 0/4	Ag. 4/10	Ag. 10/14	RCD 4/14
1	BN-REF	300,0	22,0	1391,0	314,0	0
2	B-RCD 10%		22,9	1091,1	160,5	184,0
3	B-RCD 20%		22,6	929,6	136,8	368,0
4	B-RCD 30%		22,4	769,0	112,9	551,0

NB: a/l de 0,35 e Vibração de 40 segundos



Figura 2: Aspetto dos provetes do ensaio confeccionados para relações de 0,35 W/C e 40 vibrações em segundos

Metodologia

A metodologia de todos os ensaios é baseada na norma europeia. As etapas da preparação dos provetes na câmara de cura são os dimensionamentos do tipo de betão permeável e a marcação, para os ensaios de diferentes tipos de betões permeáveis produzidos em laboratório são as regras para guiar e avaliar com os seguintes procedimentos: i) ensaios de betão fresco para definir a trabalhabilidade através dos ensaios de; a) abaixamento b) Vêbê c) densidade do betão fresco e d) teor de ar. ii) ensaios do betão endurecido para analisar as resistências com os seguintes ensaios de; a) permeabilidade, b) porosidade por imersão, c) resistência à compressão, d) resistência à tração, e) resistência a flexão, f) desgaste com máquina de Los Angeles por cântabro.

O cone de Abrams convencional de slump ou abaixamento e o ensaio de trabalhabilidade e foi utilizado para avaliar o comportamento reológico do betão. O ensaio de queda seguiu a EN 12350-2 :2019 (Norma Europeia) [49].

O ensaio de Vêbê baseado na norma de EN 12350-3 2019 [50]. Um cone de queda foi colocado no recipiente do cilindro do equipamento de ensaio Vêbê. O betão foi derramado no cone, levantado verticalmente para verificar a queda do betão, uma vez preenchido. O resultado é o tempo, em segundos, necessário para moldar completamente o betão após o disco colocado no topo do betão e o vibrador elétrico acionado.

O betão fresco foi testado analisando e correlacionando a densidade fresca (EN 12350-6 :2019) [51] com o teor de ar (EN 12350-7 :2019) [52]. A densidade do betão fresco foi calculada usando a massa e o volume do recipiente conhecido. O mesmo recipiente foi usado para determinar o teor de ar do betão fresco.

Os ensaios de betão endurecido foram realizados utilizando os provetes do ensaio envelhecidos por 28 dias. Os diferentes tipos de provetes do ensaio foram ensaiados para caracterização física e mecânica, utilizando os procedimentos de acordo com a norma para cada tipo de ensaio realizado.

a) A permeabilidade do betão foi caracterizada e avaliada através da determinação do coeficiente de permeabilidade KFH (Coeficiente de queda de cabeça), segundo a norma NLT-327/00 (Norma del Laboratorio de Transporte) [53] Seguindo Neithalath et al. [54] e o padrão ACI 522R-10 (American Concrete Institute) [55], o ensaio Falling Head Permeability foi utilizado para este fim, provetes do ensaio cilíndricos (100 mm de diâmetro e 200 mm de altura) foram usados para ensaiar cada betão. Foram utilizados três provetes do ensaio para cada betão.

b) Para os ensaios de porosidade foram escolhidos provetes do ensaio para analisar a absorção de água por imersão no betão produzido, o cubo com dimensão de 100x100x100 mm com 28 dias de cura. O procedimento de ensaio foi adaptado, conforme NP 581-1969 [56], seguindo cuidadosamente todos os procedimentos de ensaio. Os provetes do ensaio foram colocados no recipiente com água de forma que ficassem imersos em 1/3 de sua altura, por um período de 24 horas; Os provetes do ensaio foram pesados até a condição de superfície saturada até a condição de massa seca e secos em estufa ventilada à temperatura de 110 ± 5 °C até massa constante e as massas para o cálculo foram registradas.

c) Foi utilizado equipamento hidráulico para determinar a resistência à compressão do betão, cumprindo todas as instruções de acordo com a norma EN 12390-3 [57]. No caso deste ensaio, foi aplicada uma velocidade de 13,5 kN/s de acordo com o tamanho do provete de 150x150x150 mm.

d) Para o ensaio de tração os provetes do ensaio são cilíndricos de acordo com a norma EN 12390-1 [58], mas uma relação altura e diâmetro deve ser aceita pelas normas, EN 12350-1 [59] e EN 12390-2 [60] e EN 12390-6 [61] sobre a determinação da resistência à tração de provetes do ensaio.

e) Os provetes do ensaio para o ensaio de flexão são prismas de 100 x 100 x 400 mm conforme EN 12390-1 [58] e EN 12390-5 [62] e o procedimento segue as instruções da norma.

Análise e discussão dos resultados experimentais

Ensaio de betão fresco. A trabalhabilidade do betão foi avaliada pelos ensaios de abaixamento e vêbê (fig.3). Os resultados dos abaixamentos são 0 mm, e o Vêbê varia de 6,3 a 9,8 segundos, conforme mostrado na tabela 5 e o resultado mostra de normal trabalhabilidade. O aumento dos agregados reciclados reduz o resultado do ensaio Vêbê por isso definimos as percentagens do agregado reciclados para a analisar. Como os resultados do abaixamento, não foi possível estabelecer uma correlação entre os parâmetros de trabalhabilidade dos betões estudados.

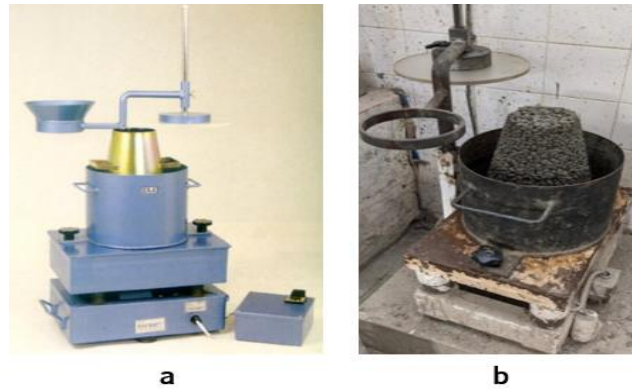


Figura 3: a) Equipamento de ensaio Vêbê, b) Ensaio Vêbê real

Na Fig. 4 apresenta-se os resultados do ensaio de Vêbê, densidade do betão fresco e teor de ar. O teor de vazios de ar varia entre 3,2 a 8%, e a densidade varia entre 1973,3 kg/m³ a 2139 kg/m³, esses valores são consistentes com a literatura para betão permeável e mostrados em (Fig. 4a, 4b e 4c).

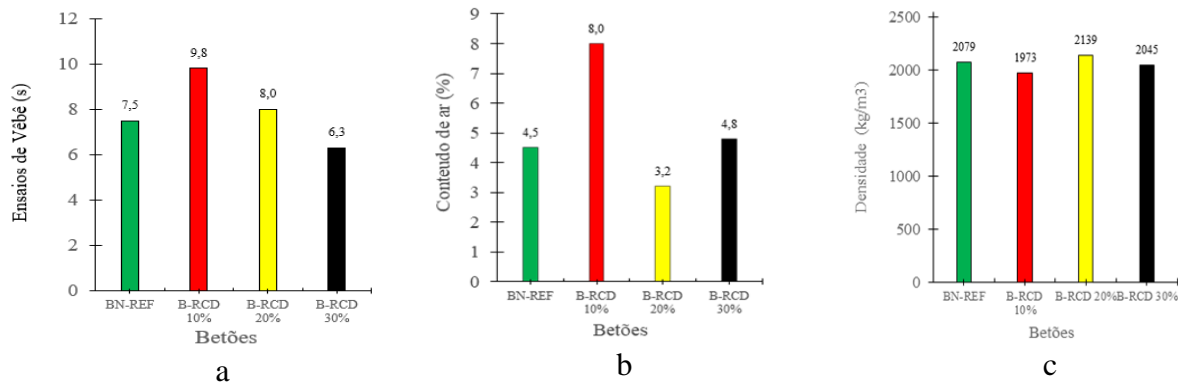


Figura 4: Resultado do betão fresco a) ensaio de vêbê, b) conteúdo de ar, c) densidade do betão fresco

Os resultados dos abaixamentos são zero e os valores médios dos resultados do ensaio de Vêbê estão entre 10 - 6 segundos para o ensaio de betão referência e betões de B-RCD (Fig.4). A melhor trabalhabilidade é verificada para betão de referência e para betão com maior percentagem de RCD. Isso se deve ao tamanho maior dos agregados reciclados em comparação com os agregados normais (Fig. 4a).

Os valores apresentados na tabela 5 também mostram que o teor de vazios de ar é semelhante para 20%, 30% dos betões reciclados e de referência. Com 10% reciclado possuindo maior teor de vazios de ar, devido à maior porosidade desta mistura. Causada pela trabalhabilidade reduzida (Fig. 4b). As densidades das misturas são semelhantes com um valor menor para 10% de agregado reciclado confirmando a maior porosidade.

Ensaio de betão endurecido

Ensaio de Permeabilidade. Em relação a permeabilidade tem três ensaios de permeabilidade de K_{LCS} (Coefficient Laboratories de Caminos de Santander), permeabilidade de K_{FH} (Coefficient Falling Head) e permeabilidade conforme a Porosidade.

A permeabilidade do betão foi avaliada pelo ensaio de coeficiente K_{LCS} conforme descrito na metodologia. Os resultados do ensaio são mostrados na tabela 6 e na fig. 5. Esses resultados de permeabilidade estão entre 4,6 a 12,9 mm/s expressos em função do fluxo de água. O betão com agregado reciclado apresenta menor permeabilidade devido à maior absorção de água desses agregados.

Os resultados das Tabelas 6 e Figuras 5a mostram os resultados entre 20 e 34 segundos, de acordo com o padrão. A permeabilidade do betão diminui com a incorporação de agregados reciclados devido à maior absorção de água desses agregados.

A permeabilidade obtida com o ensaio Falling Head Permeability (K_{FH}) está indicada na Tabela 6 e Fig. 5 com os resultados de 2,5 -12 mm/s. Em comparação, o menor fluxo de água foi com agregado reciclado, e a referência é maior. No entanto, todos os testes estão na faixa de 11-35 segundos de acordo com a norma NLT-327/00 [53].

Os resultados da porosidade por imersão são mostrados na tabela 6 variam entre 18,6% e 21,9% e a Fig. 5 é uma comparação com padrão. Os menores valores foram alcançados pelo betão de BN-REF e os maiores pelo betão B-RCD. A porosidade por imersão se mantém com o aumento da proporção de agregado reciclado, o que significa que a porosidade aberta é semelhante.

Na Tabela 6 são apresentados a porosidade e o volume de vazios do betão com B-RCD. Há uma tendência de diminuição do volume de vazios com a incorporação de RCD. Isso se deve à maior absorção de água dos agregados reciclados. Na fig. 6 mostra os resultados normais em comparação com os ensaios do padrão e autores nos artigos publicados.

Na Fig. 7 é mostrada uma comparação entre as porosidades do padrão e os resultados de outro país na citação da autora Vanessa M. K. Há uma tendência para que as porosidades deste estudo sejam menores. Isto é devido à presença de agregados reciclados.

Tabela 6: Resultado do Ensaio de permeabilidade e porosidade

Betões	Permeabilidade K_{LCS}		Permeabilidade	Porosidade por
	Laje (mm/s)	Cubo (mm/s)	K_{FH} (mm/s)	Imersão (%)
BN-REF	28,9	12,9	12,0	18,6
B-RCD 10%	19,9	10,4	10,0	21,9
B-RCD 20%	19,6	4,6	2,5	18,6
B-RCD 30%	34,0	4,8	3,9	19,4

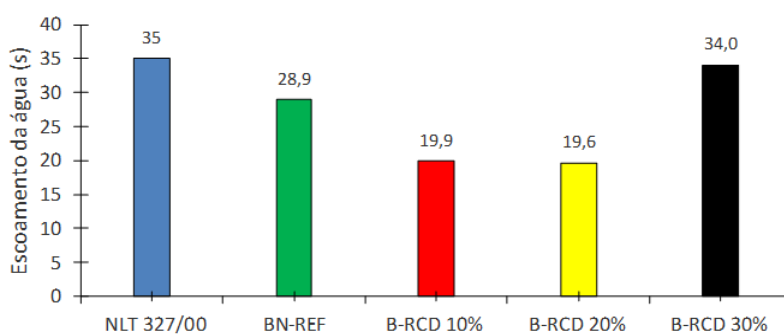


Figura 5: Comparação do escoamento da água com o padrão [53].

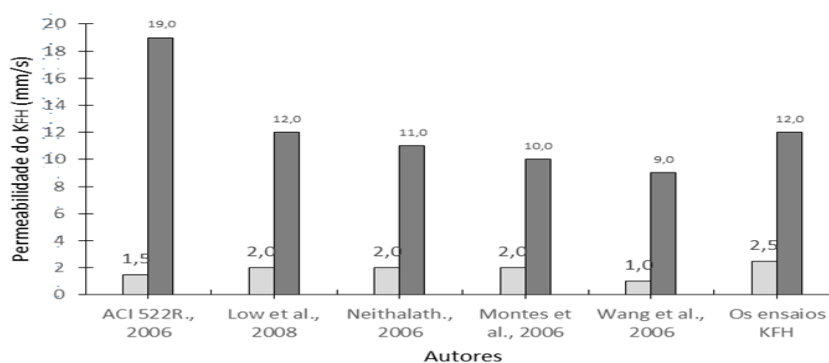


Figura 6: Comparação da permeabilidade do KLCS e KFH com o padrão [55] e autores [63], [54], [64], [29].

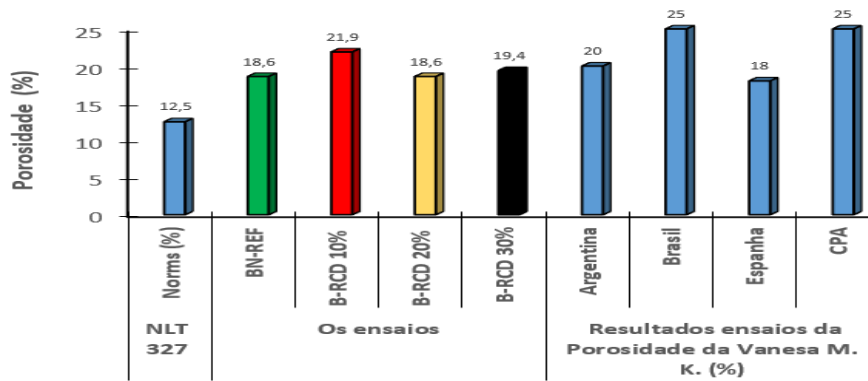


Figura 7: Comparação da porosidade com a norma [53] e resultados da Autora Vanesa [65]

Ensaio mecânico. A Tabela 7 mostra os resultados de resistência à compressão para cada betão ensaiado. Com uma faixa de valores entre 8,9 a 21,7 MPa, os resultados mostram que os betões ensaiados atendem aos requisitos técnicos quanto ao parâmetro de resistência à compressão para pavimentos permeáveis.

Esses resultados mostram que os betões de referência atingiram maiores valores de resistência à compressão devido ao uso de agregados normais. Em relação aos resultados para o teor de vazios, os valores estão na faixa entre 18,6% e 21,9%. (Tabela 6).

Os valores obtidos para o betão com agregado reciclado estão abaixo do valor de 21,7 MPa. Isto está de acordo com a resistência à compressão obtida por autor A. Bonicelli [66].

Os ensaios de resistência à tração dos provetes do ensaio são cilíndricos de acordo com a EN 12390-1 [56], mas uma relação altura e diâmetro deve ser aceita pelas normas. EN 12390-2 [33] e 12390-6:2003 [59]. Os resultados mostram o valor entre 1,5 a 2,0 MPa. Isto está de acordo com o valor obtido por autor A Bonicelli [66].

Os ensaios de resistência à flexão nos provetes do ensaio são paralelepípedicos de acordo com a norma EN 12390-5, [60] mas a relação comprimento/largura e espessura deve ser aceita pelas normas. Verificou-se que para cada mistura de betão de BN-REF e B-RCD os resultados estão entre 2,1 a 4,3 MPa, conforme Tabela 7 e Fig. 10. A comparação com os resultados de autor Cosic et al [67] mostra que o resultado é semelhante.

Tabela 7: Resultados dos ensaios mecânicos

Misturas	Resistência à Compressão (MPa)	Resistência à Tração (MPa)	Resistência à Flexão (MPa)	Módulo de elasticidade dinâmica (MPa)
Ref	21.7	1.5	4.3	3.96
10% RCD	8.9	1.6	2.1	2.51
20% RCD	18.6	2.0	3.7	3.67
30% RCD	16.7	1.9	3.6	3.25

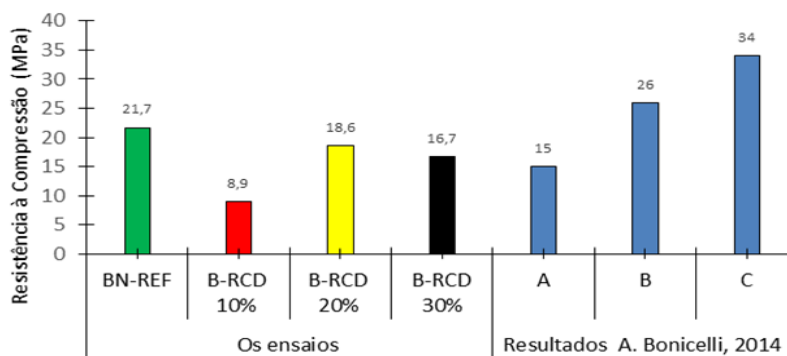


Figura 8: Comparação do resultado da resistência à compressão

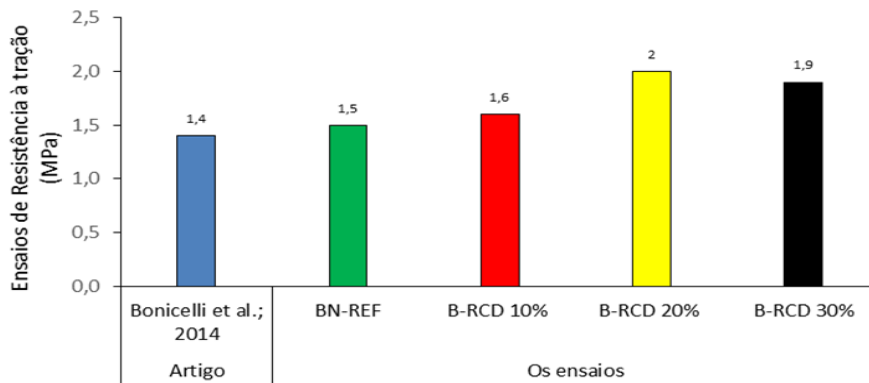


Figura 9: Comparação do resultado dos ensaios de resistência à tração

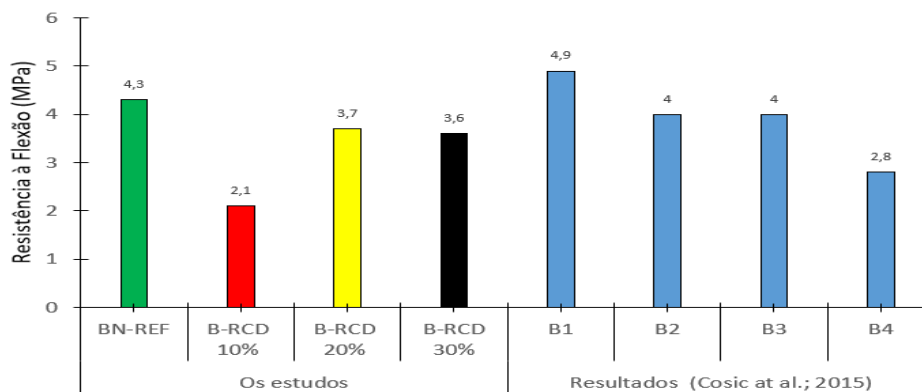


Figura10: Comparação do resultado do ensaio de resistência à flexão

Conclusões

Este artigo projetou e ensaiou três tipos dos betões de RCD (Resíduos de construção e demolição) com uma referência de betão permeável BN-REF para obter betão otimizado para pavimentação de estradas e melhorar a segurança removendo rapidamente as águas pluviais de sua superfície. Do estudo, foi possível concluir que:

- Os ensaios de abaixamento não permitiram estabelecer qualquer correlação entre os betões estudados porque o valor é 0 mm. No entanto, com base nos resultados do ensaio de Vêbê, a trabalhabilidade aumenta com a incorporação de agregados reciclados devido ao seu maior tamanho em relação aos agregados normais e reciclados.

- Em relação às variações dos parâmetros de permeabilidade em cada proporção de quatro misturas, detetou-se que os diferentes tipos dos betões de B-RCD influenciam neste parâmetro. No entanto, os resultados estão dentro dos limites da norma NLT -327/00 e EN 13108-7:2013. Assim também, os ensaios de permeabilidade do coeficiente de Falling Head K_{FH} coeficiente do padrão ACI 522R-10

- Os volumes vazios ou porosidade, os valores estão entre 18,59 a 21,94% significa que está dentro dos limites da norma NP 581-1969.

- Pelos resultados apresentados e discutidos neste artigo, o betão permeável foi identificado como otimizado devido ao seu desempenho físico e mecânico, respeitando as especificações de permeabilidade.

- Os ensaios de caracterização mecânica mostraram que o betão de referência obteve maior resistência à compressão em relação à mistura RCD. Devido ao uso de materiais normais, o resultado apresentou a maior resistência à compressão (21,7 MPa). Os betões de B-RCD 30% resultam no resultado mais alto devido à porosidade mais baixa.

- Com valores que variam de 8,9 MPa a 21,7 MPa, foi comprovado que todos os betões ensaiados atendem aos requisitos de resistência à compressão do betão permeável.

- A necessidade de reaproveitamento desses resíduos revela-se de extrema importância tanto para o meio ambiente, quanto por questões econômicas e em relação aos parâmetros de sustentabilidade.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela Adenda nº 20 ao Protocolo de Cooperação Cultural, Científica, Pedagógica e Institucional entre a Universidade do Minho e a Universidade Nacional de Timor Lorosa'e. O primeiro autor agradece o apoio da Universidade Nacional de Timor Lorosa'e esta investigação foi concluída com sucesso.

Referências

- [1] Leandro M. Souza¹, Cleber D. Assis², Silvia B. G. Souto³; Agregado reciclado: um novo material da construção civil artigo de 2014 <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/viewFile/11297/pdf> .
- [2] A. Vanacker, *Recycling of concrete at precast concrete plant*, BIBM Paris, juliet, (1996) 55-67.
- [3] United States Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov>
- [4] E. Nemirovsky, A. Welker, R. Traver, *Evaporation from a pervious concrete stormwater control measure: parameterization, quantifying, and evaluation*, World Environmental and Water Resources Congress (2011) 3610-3619.
- [5] N. Neithalath, J. Weiss, J. Olek, *Characterizing enhanced porosity concrete using electrical impedance to predict acoustic and hydraulic performance*, Cement and Concrete Research, 36 (2006) 2074-2085.
- [6] L. Haselbach, M. Boyer, J.T. Kevern, V. Schaefer, *Cyclic heat island impacts on traditional versus pervious concrete pavement systems*, Transport research Records 2240 (2011) 107-115. 418 Innovation and Sustainable Technology in Road and Airfield Pavement
- [7] J. Luck, S. Workman, M. Coyne, S. Higgins, *Solid material retention and nutrient reduction properties of pervious concrete mixture*, Biosystems Engineering, 100 (2008) 401-408.
- [8] J. Yang, G. Jiang, *Experimental study on properties of pervious concrete pavement materials*, Cem. Concr. Res., 33 (2003) 381–386, [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(02\)00966-3](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(02)00966-3).
- [9] CIP 38 - Pervious Concrete, National Ready Mixed Concrete, NRMCA, 66 Canal Center Plaza, Suite 250, Alexandria, VA 22314, (2004). <https://www.nrmca.org/>.
- [10] B. Debnath, P.P. Sarkar, *Pervious concrete as an alternative pavement strategy: a state-of-the-art review*, Int. J. Pavement Eng., (2018) 8436. <https://doi.org/10.1080/10298436.2018.1554217>.
- [11] S.V. Bittencourt, M. da Silva Magalhães, M.E. da Nóbrega Tavares, *Mechanical behavior and water infiltration of pervious concrete incorporating recycled asphalt pavement aggregate*, Case Stud. Constr. Mater. 14 (2021). <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00473>.
- [12] Epa, Storm Water Technology Fact Sheet Bioretention, Epa. (1999) 8. <https://doi.org/832-F-99-006>.
- [13] O. Deo, N. Neithalath, *Compressive behavior of pervious concretes and a quantification of the influence of random pore structure features*, Mater. Sci. Eng. A. 528 (2010) 402–412. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.09.024>.
- [14] L. Crouch, M. Cates, V. Dotson, K. Honeycutt, D. Badoe, *Measuring the Effective Air Void Content of Portland Cement Pervious Pavements*, Cem. Concr. Aggregates. 25 (2003) 1–5. <https://doi.org/10.1520/CCA10516J>.

- [15] S.W. Dean, F. Montes, S. Valavala, L. Haselbach, *A New Test Method for Porosity Measurements of Portland Cement Pervious Concrete*, *J. Astm Int.* 2 (2005). <https://doi.org/10.1520/JAI12931>.
- [16] A. Zouaghi, M. Kumagai, T. Nakazawa, *Fundamental study on some properties of pervious concrete and its applicability to control stormwater run-off*, 22 (2000) 43–50.
- [17] J. Olek, W.J. Weiss, N. Neithalath, A. Marolf, E. Sell, W. Thornton, *Development of quiet and durable porous Portland cement concrete paving materials*, (2003). <https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/16086>.
- [18] W.D. Martin, N.B. Kaye, B.J. Putman, *Impact of vertical porosity distribution on the permeability of pervious concrete*, *Constr. Build. Mater.* 59 (2014) 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.034>.
- [19] Tam, V. W. Y., Tam, C. M., and Le, K.N., 2007. *Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches*, *Resources, Conservation and Recycling*, 50 (1) 82–101.
- [20] Ismail, S., and Ramli, M, Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. *Construction and Building Materials*, 44 (2013) 464–476.
- [21] Saravanakumar, P., Abhiram, K., and Manoj, B, *Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics*, *Construction and Building Materials*, 111 (2016) 611–617.
- [22] Kim, Y., et al., *Properties enhancement of recycled aggregate concrete through pretreatment of coarse aggregates-comparative assessment of assorted techniques*, *Journal of Cleaner Production*, 191 (2018) 339–349.
- [23] Kazemian, F., Rooholamini, H., and Hassani, A, *Mechanical and fracture properties of concrete containing treated and untreated recycled concrete aggregates*, *Construction and Building Materials*, 209 (2019) 690–700.
- [24] Dilbas, H., Cakır, Ö., and Yildirim, H, *An experimental investigation on fracture parameters of recycled aggregate concrete with optimized ball milling method*, *Construction and Building Materials*, 252 (2020) 119118.
- [25] Güneyisi, E., et al., *Effect of surface treatment methods on the properties of self-compacting concrete with recycled aggregates*, *Construction and Building Materials*, 64 (2014) 172–183.
- [26] Liang, Y. C., et al., *Development of processing methods to improve strength of concrete with 100% recycled coarse aggregate*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 27 (5) (2015) 04014163.
- [27] Shi, C., et al., *Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry*, *Cement and Concrete Composites*, 86 (2018) 130–138.
- [28] Shaban, W. M., et al., *Properties of recycled concrete aggregates strengthened by different types of pozzolan slurry*, *Construction and Building Materials*, 216 (2019) 632–647.
- [29] Wang, J., et al., *Comparison of recycled aggregate treatment methods on the performance for recycled concrete*, *Construction and Building Materials*, 234 (2020) 117366.
- [30] Shaban, W. M., et al., *Effect of pozzolan slurries on recycled aggregate concrete: mechanical and durability performance*, *Construction and Building Materials*, 276 (2021) 121940.
- [31] Tam, V. W. Y., and Tam, C. M, *Assessment of durability of recycled aggregate concrete produced by two-stage mixing approach*, *Journal of Materials Science*, 42 (10) (2007) 3592–3602.

- [32] Li, J., Xiao, H., and Zhou, Y, *Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete*, Construction and Building Materials, 23 (2009) 1287–1291.
- [33] Pradhan, S., Kumar, S., and Barai, S. V, *Recycled aggregate concrete: Particle packing method (PPM) of mix design approach*, Construction and Building Materials, 152 (2017) 269–284.
- [34] Zhang, W., et al., *Effect of the optimized triple mixing method on the ITZ microstructure and performance of recycled aggregate concrete*, Construction and Building Materials, 203 (2019) 60.
- [35] Yue, Y., et al., *An industrial applicable method to improve the properties of recycled aggregate concrete by incorporating nano-silica and micro-CaCO₃*, Journal of Cleaner Production, 259 (2020) 120920.
- [36] Kisku, N., et al., *Development of durable concrete from C&D waste by adopting identical mortar volume method in conjunction with two-stage mixing procedure*, Construction and Building Materials, 256 (2020) 119361.
- [37] Kisku, N., et al., *Microstructural investigation of recycled aggregate concrete produced by adopting equal mortar volume method along with two stage mixing approach*, Structures, 24 (2020) 742–753.
- [38] Xuan, D., Zhan, B., and Poon, C. S, *Assessment of mechanical properties of concrete incorporating carbonated recycled concrete aggregates*, Cement and Concrete Composites, 65 (2016) 67–74.
- [39] Abut, Y., et al., *A comparative study on the performance of RCC for pavements casted in laboratory and field*, International Journal of Pavement Engineering, (2020) 1–14. <https://doi.org/10.1080/10298436.2020.1823391>.
- [40] Portland Cement Association, Thickness design for concrete highway and street pavements, Skokie, IL: PCA, USA (1984).
- [41] AASHTO, Guide for design of pavement structures. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials (1993).
- [42] CROW, Design software for concrete roads (VENCON 2.0, CD ROM D925) (2004) [Computer softw
- [43] AASHTO, Mechanistic empirical pavement design guide. A manual of practice-interim edition. Washington, DC: American Association of State Highway and Transportation Officials (2008).
- [44] Indian Roads Congress, Guidelines for the design of plain jointed Rigid pavements for highways. In: IRC 58, Indian Roads Congress, New Delhi, India, June 2015, Fourth revision (2015).
- [45] SECIL, Supratek Cimento Portland, Fábrica Maceira-Liz, (2018).
- [46] EP - Estradas de Portugal, Pavimentação Características dos materiais, Cad. Encarg. Tipo Obra. 03 (2014) 125.
- [47] NP EN 1097-6:2000. Test for mechanical and physical properties of aggregate part 6: Determination of particles density and water absorption.
- [48] NP EN 1097-2:2002. Los Angeles Machine Wear Resistance Test Instituto Português da Qualidade, p. Caparica, Lisboa.
- [49] EN 12350-2, Testing fresh concrete. Slump test, BSI. (2019) 12.
- [50] EN 12350-3,

- [51] EN 12350-6, Testing fresh concrete. Density, (2019).
- [52] EN 12350-7, Testing fresh concrete. Air content. Pressure methods, (2019).
- [53] NLT-327/00, Permeabilidade in situ de pavimentos drenantes mediante permeámetro LCS, Espana, (2000).
- [54] N. Neithalath, J. Weiss, J. Olek, *Predicting the Permeability of Pervious Concrete (Enhanced Porosity Concrete) from Non-Destructive Electrical Measurements*, ResearchGate, (2006) 1–22.
- [55] ACI 522R-06, Pervious Concrete, (2010).
- [56] NP- 581:1969, Determination of volumic masses and water absorption of aggregates and stones; standard written in portuguese.
- [57] EN 12390-3, 2003. Testing hardened concrete. Compressive strength of test specimens, BSI. (2019) 24. standard written in portuguese
- [58] EN. 12390-1: 2003, Tests of hardened concrete part 1: Shape, dimensions and other requirements for testing specimens and molds; standard written in portuguese.
- [59] EN. 12350-1: 2002, Fresh Concrete Tests Part 1: Sampling; standard written in portuguese.
- [60] EN. 12390-2, Tests of hardened concrete. Part 2: Execution and curing of specimens for mechanical strength tests. (2009); standard written in portuguese-
- [61] IPQ, NP EN 12390-6: Tests of hardened concrete - Part 6: Tensile strength by compression of specimens. for. 14, (2003): standard written in portuguese.
- [62] NP EN 12390-5, Hardened concrete, bending strength pdf.
- [63] Low K, Harz D, Neithalath N. *Statistical characterization of the pore structure of enhanced porosity concrete*, Proceedings in CD of the 2008 Concrete Technology Forum, Denver, National Ready Mix Concrete Association, (2008).
- [64] Montes and L. Haselbach, Measuring hydraulic conductivity in pervious concrete, *Environ. Eng. Sci.*, 23, no. 6 (2006) 960–969.
- [65] V. D. L. F. Francisco, *A Drenagem Superficial e o seu Impacto Funcional e Estrutural na Vida dos Pavimento*, Universidade de Porto, (2009).
- [66] A. Bonicelli, F. Giustozzi, M. Crispino, and M. Borsa, *Investigation on the functional and mechanical performance of differentially compacted pervious concrete for road pavements*, (2014) 265–272.
- [67] K. Ćosić, L. Korat, V. Ducman, I. Netinger, *Influence of aggregate type and size on properties of pervious concrete*, *Constr Build Mater*, 78 (2015) 69-79. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.073>.

Sistemas de Construção Modular Adaptado para Ambientes Construídos Saudáveis

SIMÕES Fábio^{1, a}, SILVA Jaime^{2, b}, MOUTINHO Isabel^{3, c}, BAPTISTA Luís^{5, d},
CARVALHO Anabela^{4, e}, MALGUEIRO Regina^{4, f}, MOREIRA Sérgio^{4, g},
VICENTE Romeu^{1, h} e FERREIRA Victor^{1, i}

¹ RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago 3810-193 Aveiro, Portugal

² CONCEXEC – Arquitetura Lda, R. Dr Ernesto Soares dos Reis 208 1º Andar - Sala S, 3720-256 Oliveira de Azeméis, Portugal

³ SONAE ARAUCO Portugal, SA, Lugar do Espido, Via Norte Apartado 1129, 4470-177 Maia, Portugal

⁴ CeNTItvc, Rua Fernando Mesquita, 2785, 4760-034 V.N. Famalicão, Portugal

⁵ SONAE ARAUCO Portugal, SA, Água Levada, Apartado 168, 3534-956 Mangualde (Viseu), Portugal

^afjfs@ua.pt, ^bjaimesilva@concexec.pt, ^cisabel.moutinho@sonaearauco.com,

^dlbaptista@sonaearauco.com, ^eacarvalho@centi.pt, ^frmalgueiro@centi.pt, ^gsmoreira@centi.pt, ^hromvic@ua.pt, ⁱvictorf@ua.pt

Palavras-chave: Construção modular, Sensorização, Ambientes assistidos, Sustentabilidade.

Resumo: A crescente tendência para o aumento da população idosa, indica que a taxa de envelhecimento irá mais do que duplicar de 147 para 317 idosos por cada 100 jovens em 2080. Assim, as necessidades de cuidados de saúde descentralizados e a utilização do ambiente construído (o nosso habitat) como um espaço onde a população tende a passar mais tempo, desempenha um papel crucial na luta contra o isolamento e para proporcionar uma melhor qualidade de vida. O projeto ActiVas - Ambientes construídos para uma vida ativa, segura e saudável, tem como um dos principais objetivos a integração em sistemas construtivos modulares de soluções desenvolvidas para o suporte de espaços saudáveis, adaptáveis e transformáveis para necessidades humanas específicas ao longo da vida. Este trabalho apresenta as exigências e especificações técnicas da conceção do sistema construtivo em estrutura de alumínio e painéis de derivados de madeira, adaptativo e transformável, integrando soluções de sensorização (temperatura, humidade e vibração) em estruturas modulares numa solução única e compacta para o propósito do projeto.

Introdução

O envelhecimento populacional irá provocar alterações significativas em todos os setores da sociedade, desde o mercado laboral ao financeiro, bem como, causar mudanças na procura de bens e serviços, nomeadamente na habitação, nos transportes e na proteção social. Além disso, irá provocar alterações nas estruturas familiares e nos laços intergeracionais [1]. No início do século XXI, o cenário do envelhecimento alterou-se, a população portuguesa jovem tem diminuído e, em contrapartida, a população portuguesa idosa tem aumentado. O índice de envelhecimento em 2021 era de 182,7 idosos por cada 100 jovens [2], e num prazo de 60 anos (2080) esta taxa passará quase para o dobro, ou seja, para 317 idosos por cada 100 jovens [3]. Face a este cenário, é possível identificar algumas necessidades ao nível do *habitat* que poderão passar:

- pela instrumentação do espaço construído, de modo a permitir um ambiente mais interativo, colaborativo e com capacidade de avaliação funcional não intrusiva dos utentes e dos hábitos de vida saudável;

- pela transformação e a adaptação dos espaços ou ambientes construídos ao longo do tempo, de acordo com a evolução das necessidades dos habitantes desse mesmo espaço;
- pela conceção, validação, avaliação e valorização das tecnologias da informação e da comunicação (TIC) para a construção de ambientes inteligentes, seguros e saudáveis;
- pela criação de redes colaborativas conectadas, promovendo uma maior e melhor articulação de esforços na prestação de cuidados informais, fazendo face à mudança de paradigma assistencial e fortalecendo as redes de cuidados de proximidade.

Atualmente a construção modular produz um conjunto de produtos normalizados que são anteriormente produzidos numa fábrica e, depois, são montados no local de implantação da solução desenvolvida, de acordo com o projeto desenvolvido [4]. Este tipo de solução ou metodologia gera rapidez e segurança nos processos de construção e previsibilidade na entrega da obra. Ao mesmo tempo, gera poupança de mão de obra e de recursos técnicos e materiais aumentando a eficácia e eficiência dos processos [5]. Neste contexto, o mercado apresenta um conjunto de sistemas construtivos modulares em sistemas variados, que podem ser em betão, em madeira, em aço leve (*light steel frame*), em compósitos ou numa combinação dos materiais anteriores [6]. Quando se implementa estes sistemas no mercado da construção, as soluções devem garantir a segurança e a saúde das pessoas durante o ciclo de vida da solução através do cumprimento dum conjunto de requisitos e exigências básicas [7] :

1. Resistência mecânica e estabilidade
2. Segurança contra incêndio
3. Higiene, saúde e ambiente
4. Segurança e acessibilidade em uso
5. Isolamento acústico e absorção sonora
6. Isolamento térmico, conforto e eficiência energética
7. Uso sustentável de recursos

Face ao cenário do crescimento da taxa de envelhecimento e da permanência da população idosa no seu ambiente construído (*habitat*) torna-se necessário encontrar soluções que promovam o combate ao isolamento e que ajudem a proporcionar uma melhor qualidade de vida. Este trabalho pretende contribuir para criar uma solução de mercado, competitiva e que promova a qualidade de vida da população idosa.

Projeto ActiVas

No presente, não existem soluções no mercado que respondam de forma integrada aos desafios do envelhecimento da população, na dimensão económica, social e ambiental, nas cidades e nos ambientes construídos. Foi para isso que surgiu o projeto “ActiVas – Ambientes Construídos para uma Vida Ativa, Segura e Saudável”, com o objetivo de responder às necessidades e lacunas observadas na cadeia de valor do *habitat*. Assim, o foco deste projeto é investigar, desenvolver e demonstrar, em contexto real, um conjunto de soluções “de vida ativa e saudável” que promovam a disponibilização de produtos e serviços inteligentes de suporte à rede de cuidados de proximidade e de saúde, mas também ao mercado imobiliário da hospitalidade.

A implementação do projeto tem por base o desenvolvimento de diversos produtos, processos e serviços (PPS) (ver Figura 1) que, posteriormente, serão integrados e validados em soluções conjugadas para o mercado. Os diversos produtos e soluções focam-se nas áreas de desenvolvimento seguintes:

- Soluções para ambiente construído sócio-conectado – investigar e desenvolver protótipos para soluções de conectividade;
- Ambientes construídos interativos e não intrusivos – especificar e arquitetar soluções para ambientes interativos e não intrusivo;
- Soluções para espaços ajustáveis no tempo e às necessidades dos utentes – prototipar e arquitetar soluções para espaços ajustáveis no tempo e às necessidades dos utentes;

- Soluções para espaços amigáveis e seguros – desenvolver e validar soluções para espaços amigáveis e seguros;
- Gestão integrada de soluções e modelos de negócios para ambientes assistidos – validar e demonstrar todas as soluções desenvolvidas em ambiente real, de acordo com o quadro regulamentar dos produtos tecnológicos;

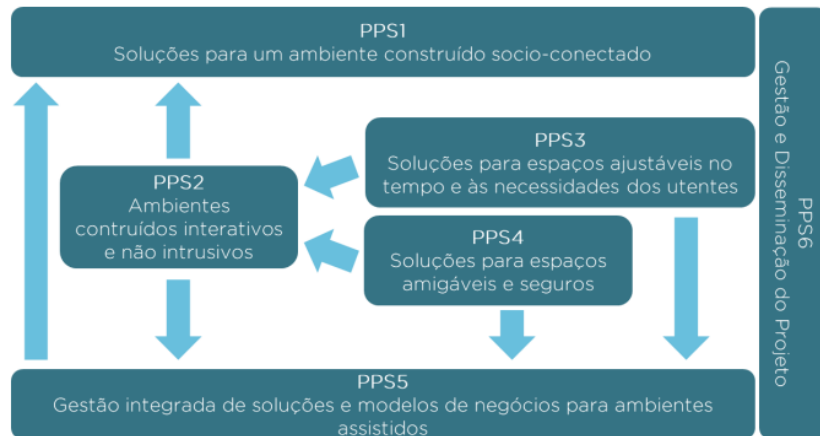


Figura 1: Identificação e relacionamento dos PPS que se inserem no projeto ActiVas. [6]

As soluções resultantes deste projeto têm por objetivo alterar o paradigma das cadeias de valor globais do *habitat*, da saúde e das TIC. Deste modo, as novas soluções pretendem alcançar os seguintes objetivos estratégicos (OEx):

- OE1 - Fazer evoluir o conceito de Habitat, dotando-o de capacidade adaptativa e transformativa, em linha com as necessidades das diferentes faixas etárias;
- OE2 - Compreender os fatores determinantes da saúde, do bem-estar e da doença;
- OE3 - Prevenir e tratar doenças na senioridade;
- OE4 - Promover o envelhecimento ativo e autogestão da saúde;
- OE6 - Otimizar os métodos e cuidados de saúde informais de forma mais eficaz;
- OE7 - Diminuir o “*gap*” existente entre a população sénior e outras faixas etárias da sociedade;
- OE8: Combater o isolamento da população sénior.

Este artigo pretende mostrar parte do trabalho desenvolvido no projeto ActiVas que tem por objetivo estudar diferentes soluções de sensorização de materiais e superfícies de mobiliário e de revestimentos interiores, bem como, a sua integração no sistema modular construtivo.

Sistema modular construtivo

O sistema modular construtivo, usado como base neste estudo, assenta na solução de uma empresa parceira do projeto, a CONCEXEC. Este sistema consiste na assemblagem de um conjunto de painéis pré-fabricados com um encaixe resistente inovador. A sua pré-fabricação e modularidade envolve na ligação entre painéis uma estrutura de perfis de alumínio (sistema autoportante), sem a necessidade de uma estrutura reticulada, assente sobre um princípio de encaixe e travamento sem o uso de colas ou de fixação mecânica. A solução construtiva (Figura 2 e Figura 3) apresenta um elevado índice de circularidade pois permite a montagem e a desmontagem programada dos painéis, conferindo um carácter evolutivo à construção, através da sua mobilidade e adaptação às necessidades do espaço e seus utentes. Face ao sistema construtivo convencional, o sistema modular pré-fabricado permite vantagens como a rápida e fácil alteração de layout interior da habitação, menores custos, reabilitação menos invasiva, menor geração de resíduos em obra e menos mão-de-obra.

Os painéis modulares pré-fabricados poderão apresentar dimensões padrão pré-definidas de acordo com a sua classificação enquanto painéis de parede, de pavimento, de pavimento intermédio e de painéis de cobertura.

A adoção desta solução gera um conjunto de benefícios para o proprietário que são:

- Celeridade na construção;
- Maior controlo nos custos e nos prazos;
- Poupança de materiais e de recursos;
- Facilidade no processo de construção;
- Redução de impacto do estaleiro no meio ambiente;
- Aumento da segurança no estaleiro;
- Encurtamento de espaço de expedição no estaleiro;
- Diminuição nas paragens e atrasos em obra;

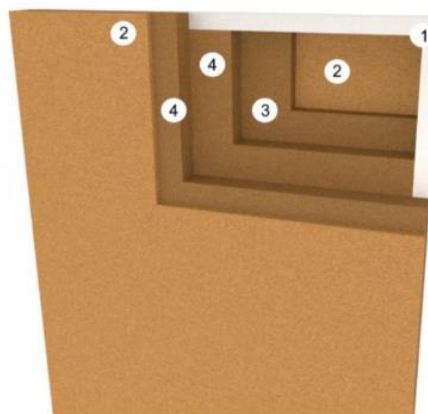


Figura 2: Estrutura metálica base do sistema modular construtivo da CONCEXCEC.

Neste projeto incorporou-se dentro do sistema modular construtivo os painéis do sistema AGEPAN[®], no sentido de apresentar uma solução construtiva base composta por dois materiais principais, o alumínio e os derivados de madeira. Pretende-se que, pelas suas características técnicas, o painel AGEPAN[®] seja neste sistema construtivo o material nuclear que, em conjunto com as camadas mais superficiais (interior e exterior) assegure pela sua densidade, compactação e resistência, nível mínimo de isolamento acústico e térmico e contribua para a resistência mecânica.

A solução base do sistema construtivo com recurso a estes painéis, em multicamada, apresenta a seguinte composição:

- Exterior: Revestimento delgado armado (com espessura de 4 mm)
- AGEPAN[®] DWD Protect 16 mm
- AGEPAN[®] THD 40 mm
- AGEPAN[®] THD 60 mm + 60 mm
- AGEPAN[®] DWD Protect 16 mm
- Interior: Revestimento delgado armado para acabamento interior (com espessura de 4 mm).



- 1 - Estrutura em alumínio
- 2 - AGEPAN DWD Protect 16 mm
- 3 - AGEPAN THD 40 mm
- 4 - AGEPAN THD 60 mm

Figura 3: Esquema da constituição do painel base.

Todos os painéis apresentam no seu interior uma configuração de negativos maquinados (espaços ou canais) de forma tipificada, dois longitudinais a toda a extensão do painel e uma transversal a toda a largura do painel, permitindo desta forma em qualquer painel a instalação, passagem e integração de infraestruturas técnicas, como as elétricas, de telecomunicações, de distribuição de água e drenagem, bem como promover a sua mudança de direção entre os espaços (negativos) verticais e horizontais entre os painéis (Figura 4). Esta reversibilidade é uma das vantagens do sistema construtivo modular face à construção convencional. Serão ainda efetuados testes de avaliação do desempenho térmico, acústico e de resistência ao fogo aos painéis do sistema construtivo modular.



Figura 4: Exemplo de integração de negativos no painel.

Com o objetivo de acrescentar funcionalidades ao sistema modular construtivo que visam o promover o bem-estar do público-alvo numa vertente de adaptabilidade à medida das necessidades, o presente sistema servirá de estrutura integradora de materiais ou produtos (painéis, revestimentos, pavimentos e mobiliário) sensorizados e responsivos.

Para os diversos testes será construído um protótipo à escala real (Figura 5) integrando as diferentes soluções tecnológicas e que permitirá ainda a operacionalização da montagem e desmontagem dos painéis modificados após terem recebido as ligações para alimentação e comunicação do sistema. São sobretudo testes que visam apurar a facilidade e rapidez de montagem e desmontagem, para além da reversibilidade, estabilidade e segurança das soluções integradas, de modo a não romper com a forma de edificação com este tipo de sistema construtivo modular pré-fabricado e as suas características distintas.

Sensorização de materiais e de componentes

Numa das suas áreas de investigação, o projeto Activas envolve o desenvolvimento de mobiliário funcional e responsivo através de soluções de revestimento funcionais para limpeza melhorada e higienização (limpeza fácil e antimicrobiano) e de sensorização em estruturas de base de madeira, nomeadamente os materiais MDF e HDF. A produção destas soluções recorre a diferentes tecnologias de deposição, de modo a facilitar a produção à escala industrial. Relativamente à aplicação dos revestimentos funcionais, estes poderão aplicados em mobiliário de utilização diversa no habitat, o qual pode ser exposto a atmosferas propícias à acumulação de sujidade de difícil remoção como, por exemplo, gorduras e sujeitas ao aparecimento de contaminações microbianas de potencial patogénico. São exemplo de possíveis aplicações destas soluções de sensorização e acabamento de superfície os produtos apresentados na Figura 6.

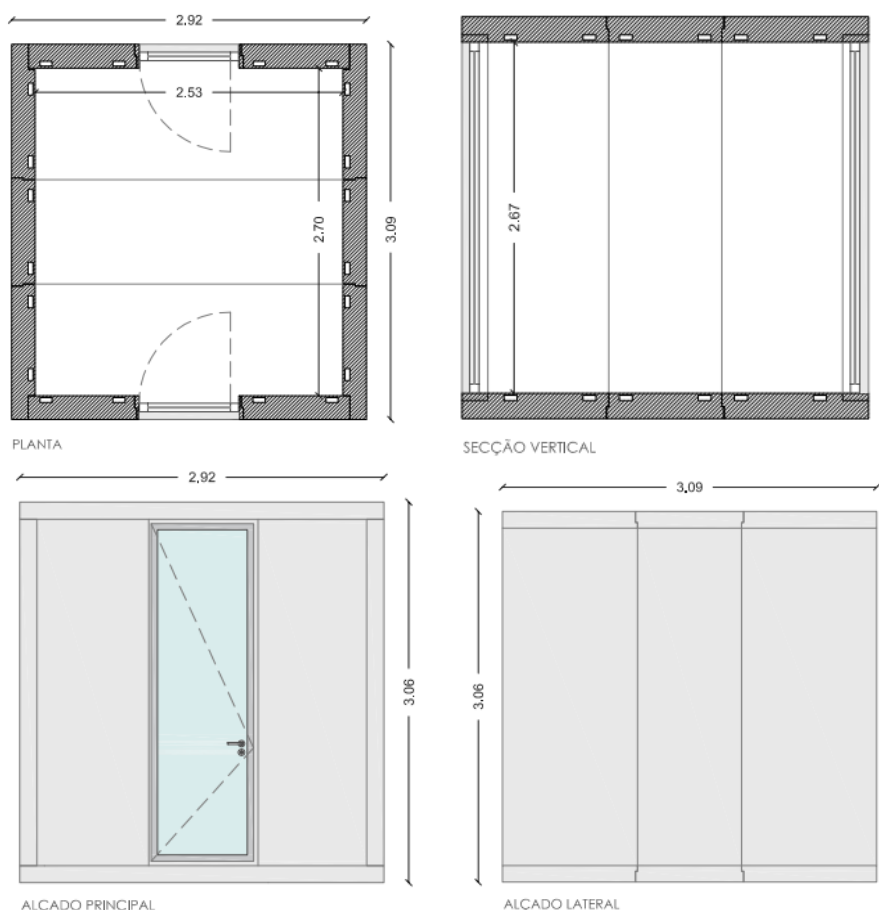


Figura 5: Protótipo do sistema modular construtivo do projeto ActiVas (dimensões em metros).



Frente de cozinha



Tampo de Mesa

Figura 6: Exemplos de estruturas de base de madeira aplicadas em mobiliário.

Paralelamente aos revestimentos funcionais foram desenvolvidas soluções de sensorização para estas estruturas de base madeira para mobiliário, pelo desenvolvimento e integração de sensores capacitivos e feedback háptico por recurso a tecnologias de eletrónica impressa, com o objetivo de dotar os materiais em estudo de funcionalidades ativáveis por toque e proximidade. Na imagem abaixo (Figura 7) apresenta-se um exemplo de interface com o utilizador, que permite a interação deste com o sistema construtivo sensorizado, para ativação/desativação de elementos existentes na habitação (ar condicionado, luzes, estores, etc.), podendo ainda gerar alertas para o cuidador em casos específicos. Este painel de interface poderá estar total ou parcialmente integrado nos módulos do painel construtivo e/ou no mobiliário, em função das necessidades identificadas para cada sistema habitacional.



Figura 7: Representação esquemática do painel de interface com sensorização integrada para controlo do sistema habitacional.

Além do mobiliário funcional e responsivo foram também desenvolvidos os sensores de temperatura, de humidade para serem integrados nas estruturas de base de madeira para mobiliário, de modo a permitir a adaptação e interligação dos sistemas construtivos com as necessidades dos utilizadores e/ou cuidadores.

Adicionalmente, são equacionados sensores de vibração baseados numa resposta piezoelétrica. Esta solução, dota o sistema modular construtivo da capacidade de detetar potenciais vibrações anómalas como, por exemplo, quedas dos indivíduos com mobilidade reduzida, permitindo assim gerar um alerta. Para que os mesmos possam promover o estímulo vibracional, a integração do sensor na componente construtiva contendo materiais estruturais de base madeira tem em atenção locais estratégicos que permitam ao mesmo ter liberdade de movimentos, de forma a facilitar o seu bom funcionamento. Desta forma, é possível ajustar o ambiente habitacional às necessidades específicas de uma forma integrada, e incrementar a qualidade de vida do utilizador.

Conclusão

O projeto mobilizador ActiVas pretende garantir uma solução construtiva tecnológica e inovadora para uma vida ativa e saudável com bom desempenho técnico, através da colaboração de três diferentes cadeias de valor, nomeadamente, a do Habitat, Saúde e TIC.

A solução construtiva modular pré-fabricada incorpora um conjunto de soluções em desenvolvimento, que abrange os seus painéis e revestimentos associados pelo interior e exterior e que pretende funcionalizar de modo a permitir a interação e monitorização de forma focada na qualidade de vida e saúde dos habitantes, passível de se adaptar às necessidades ao longo da vida. A inserção destes instrumentos de sensorização e monitorização visa a inclusão de mais valias em produtos e sistemas para o habitat, garantindo que não se perde a qualidade, a rapidez e a reversibilidade na montagem e desmontagem do sistema construtivo modular. Esta solução construtiva composta será posteriormente ensaiada para avaliar outras características complementares como a resistência ao fogo, isolamento térmico e acústico.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro do projeto mobilizador I&DT ActiVas - Ambientes construídos para uma vida ativa, segura e saudável (POCI-01-0247-FEDER-046101), cofinanciado ao abrigo do Sistema de Incentivos à Investigação e Desenvolvimento Tecnológico, no âmbito do Portugal 2020, através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE) e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Referências

- [1] UNRIC, *Envelhecimento*, <https://unric.org/pt/envelhecimento/>, em 12/09/2022.
- [2] Pordata, *Indicadores de envelhecimento segundo os Censos*, <https://www.pordata.pt/portugal/indicadores+de+envelhecimento+segundo+os+censos-525>, em 12/09/2022.
- [3] INE, *Destaque informação à Comunicação Social- Instituto Nacional de Estatística*. Lisboa Março 2020, 1–21.
- [4] Bertram, N.; Fuchs, S.; Mischke, J.; Strube, G.; Woetzel, J. *Modular construction: From projects to products* / McKinsey, <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/modular-construction-from-projects-to-products>, 19/09/2022.
- [5] Ferdous, W.; Bai, Y.; Ngo, T.D.; Manalo, A.; Mendis, P, *New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings – A state-of-the-art review*, *Engineering Structures*, 183, (2019) 883–893.
- [6] Dan-Adrian, C.; Tsavdaridis, K.D, *A comprehensive review and classification of inter-module connections for hot-rolled steel modular building systems*, *Journal of Building Engineering.*, 50, (2022) 104006.
- [7] EU, *Regulamento n.º 305/2011*, EUR-Lex, 2011.

Armazenamento de energia: simulação numa unidade habitacional

FIGUEIRÔA Ísis^{1,a}, PINTO António^{1,b} e BRAGANÇA Luís^{1,c}

¹ Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

^a isisgfigueiroa@gmail.com, ^b antoniofrp@gmail.com, ^c braganca@civil.uminho.pt

Palavras-chave: Inovação; Armazenamento de energia; Energia renováveis; Independência energética.

Resumo. Face à atual crise energética, é urgente reduzir a produção de energia com origem em fontes poluidoras, e aumentar as limpas e renováveis. Com possibilidade de armazenamento, é possível que a energia elétrica produzida nas horas de menor procura, com baixo custo e/ou por fontes intermitentes, possa ser consumida nas horas de maior procura, aproveitando todo o potencial das fontes de energia renovável. Este estudo apresenta diferentes possibilidades para armazenar energia e, em particular, alguns sistemas de utilização para pequena escala aplicados a um cenário real em Portugal. Através do contacto com diferentes especialistas e fabricantes do setor, foram recolhidos importantes dados que contribuíram para resultados mais assertivos. Foi realizado um levantamento das necessidades energéticas da tipologia mais representativa do edificado em Portugal, de forma a verificar o sistema de armazenamento de energia mais indicado e o seu desempenho. Os sistemas atualmente utilizados revelam ainda algumas limitações, contudo, verifica-se que com o desenvolvimento de tecnologias emergentes, poderá ser possível alcançar a independência energética a médio prazo.

Introdução

O mundo atravessa uma enorme crise energética, agravada pela atual conjuntura económico e ambiental. Se nada for feito e implementado a uma escala global, aproximam-se cenários graves de escassez, interrupções no fornecimento de energia por instabilidade das fontes, risco de esgotamento, e danos ambientais irreversíveis. Nesse sentido, é urgente reduzir drasticamente a produção de energia proveniente de fontes não renováveis, como o carvão e o gás natural, poluidoras e responsáveis por grande parte das emissões de CO₂ libertadas para a atmosfera.

A solução passa inevitavelmente por adotar soluções sustentáveis, como a produção de energia proveniente de fontes limpas e renováveis. Contudo, estas fontes de energia são intermitentes, como a solar e a eólica, assim como, a procura é inconstante, variando da altura do dia ou da estação do ano. Estes dois factos dificultam a implementação deste tipo de estratégias em detrimento da energia proveniente de fontes não renovável [1].

É por isso fundamental armazenar a energia gerada por fontes renováveis. A energia, produzida em qualquer momento do dia, ou mesmo estação do ano, que não é utilizada logo quando é gerada, é guardada e consumida nas horas de maior procura, otimizando o consumo de energia produzida, evitando assim o seu desperdício quando a produção é superior ao seu consumo, ou, evitando recorrer ao consumo de energia proveniente de fontes de energia não renovável, quando a produção de energia é menor ao seu consumo. Energy Storage Systems (ESS) é o termo mais comum para identificar este tipo de sistemas [1].

Com isto, o objetivo deste estudo foi de pesquisar os sistemas de armazenamento de pequena escala disponíveis no mercado, analisar as suas características mais relevantes e aplicá-los a um cenário real, verificando a viabilidade económica e a capacidade de responder a uma necessidade diária da tipologia mais predominante em Portugal.

Energia – produção e consumo

Energia em Portugal. Portugal não produz energia suficiente para ser autónomo, dependendo do fornecimento energético de outros países. Segundo alguns dados, Portugal ocupava em 2020, o 11.º lugar dos países da Europa com maior dependência energética, cerca de 65,3%, ficando à frente da média europeia [2], importando produtos de fontes poluentes, como o petróleo bruto.

Contudo, no que toca à produção e consumo de energia proveniente de fontes renováveis, o cenário inverte-se, destacando-se na transição energética, Portugal foi o quarto país da União Europeia com maior incorporação renovável na geração de eletricidade, considerando o primeiro quadrimestre de 2022, sendo uma percentagem acumulada de 59,4% [3] (Figura 1). E ainda no âmbito da transição energética do país, no final de 2021, as centrais de carvão, fonte muito poluidora, de Sines e do Pego foram encerradas.

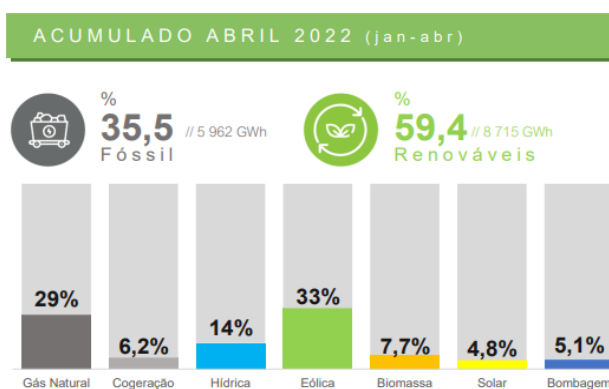


Figura 1: Fontes de energia gerada por Portugal, acumulados jan-abr de 2022 [3].

Esta estratégia tem contribuído para Portugal reduzir as emissões de gases com efeito de estufa (Figura 2). Segundo a Associação Portuguesa de Energias Renováveis (APREN), assistiu-se a uma redução de 74% dos níveis de emissão destes gases, entre o ano 2000 e 2021 [3]. No entanto, os resultados apresentados, não contabilizam as emissões de gases efetuadas noutros países, fruto da produção de energia com origem em fontes poluidoras e não renováveis, e que posteriormente é importada e consumida em Portugal.

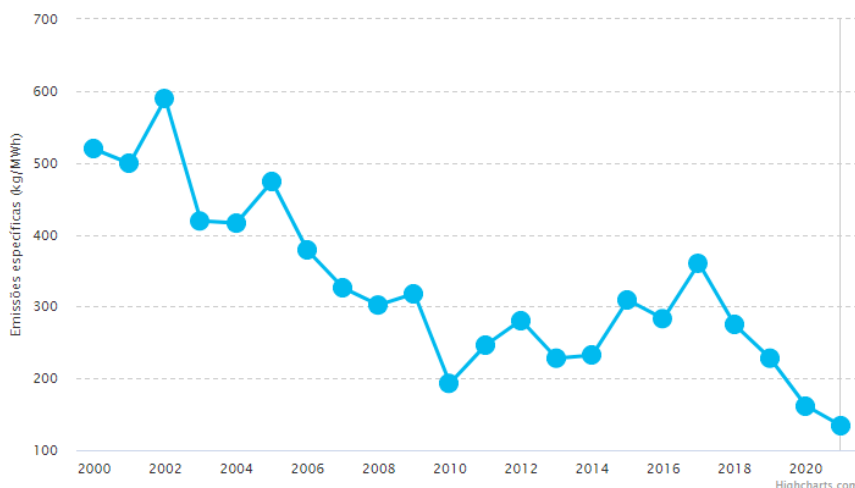


Figura 2: Emissões de GEE em Portugal no século XXI [3]

Energia proveniente de fontes renováveis. Está-se a assistir a uma mudança de paradigma na distribuição e consumo de energia elétrica devido à produção de energia proveniente de fontes renováveis, como a energia solar, eólica, hídrica, das ondas, geotérmica, bombas de calor e biocombustíveis.

A sua produção tem crescido (Figura 3), sendo hoje responsável por um pouco mais de 20% da geração de energia nos 27 países da União Europeia [4].

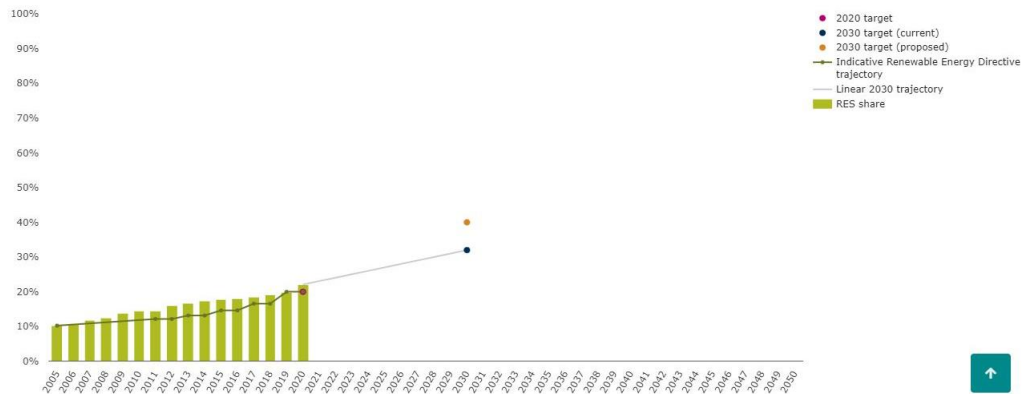


Figura 3: Progresso de fontes de energia renovável na União Europeia. Gráfico de 2020 [4]

A produção deste tipo de energia pode ser dividida em grande, média ou pequena escala, como por exemplo, barragens ou parques eólicos para o abastecimento energético de uma grande área populacional, ou para um grupo mais reduzido, como o quarteirão ou o condomínio, onde estruturas de menor escala podem ser implementadas, nomeadamente os parques fotovoltaicos. Porém, já há também estruturas menores que são adotadas à escala do edifício individual.

Energia e seu armazenamento

Diante do panorama de crise energética atual e a necessidade de uma transição energética para geração através de fontes renováveis, as tecnologias de armazenamento de energia mostram-se uma alternativa promissora para um cenário de neutralidade carbônica.

Vantagens de armazenar a energia. O sucesso da produção de energia, através de fontes renováveis, está diretamente relacionado com o armazenamento de energia, no qual permite:

- Acabar com a dependência energética;
- Acabar com a intermitência na geração de energia renovável, através do armazenamento da energia produzida em alturas de pouca procura, para utilização posterior;
- Rentabilizar a energia renovável, permitindo um menor consumo da energia proveniente de fontes não renováveis e poluentes [1], diminuindo a produção de CO₂ e sua libertação para a atmosfera;
- Uma fonte de rendimento através da venda da energia excedente nas horas de maior consumo, armazenada nas horas de menor procura;
- Responder rapidamente às flutuações na procura;

Escalas de armazenamento de energia. De acordo com a sua potência elétrica, os equipamentos de energia podem ser definidos da seguinte forma:

1. Grande escala: equipamentos utilizados em grandes estruturas de produção de energia com capacidade de Gigawatt [GW], como subestações e barragens (Figura 4).
2. Média escala: equipamentos com capacidade de armazenar energia à escala do Megawatt [MW], são utilizados sobretudo para responder às necessidades energéticas de pequenas comunidades como quarteirões, bairros ou um conjunto bem definido de edifícios. Estas comunidades são responsáveis pela produção e armazenamento da sua própria energia, que posteriormente, é partilhada e consumida entre os edifícios que constituem o grupo. Este conceito de comunidade de energia é uma das medidas definidas pela União Europeia para a descarbonização do setor.
3. Pequena escala: equipamentos com capacidade de kilowatt [kW], utilizados para armazenar energia em edifícios de uma forma individualizada.



Figura 4: Sistemas de armazenamento [5].

Formas de armazenamento de energia. Dependendo do sistema de armazenamento de energia utilizado, a energia é acumulada sob diferentes formas, para posteriormente, e quando é necessário, ser convertida em eletricidade. Assim o armazenamento de energia pode ser:

1. **Químico:** A energia, em forma de gás combustível, é armazenada para posteriormente ser transformada em eletricidade ou combustíveis sintéticos. Para a transformação destes elementos em gás, podem ser utilizadas energias provenientes de fontes renováveis [6], e o armazenamento pode ser realizado através da produção de hidrogénio, por eletrólise, combustíveis sintéticos ou metanação de CO₂.

O hidrogénio, em particular, é uma grande aposta para a descarbonização do setor de construção, pois a sua produção não emite gases poluentes e é o elemento mais abundante disponível no mundo. Para aplicação à escala do edifício, estão a ser testados equipamentos que permitem produzir e armazenar hidrogénio, para posterior transformação em energia elétrica, utilizada para consumo em edificações destinadas ao uso de habitação ou comércio (Figuras 5 e 6).



Figuras 5 e 6: Sistemas de armazenamento em forma de hidrogénio para pequena escala (Solenco Powerbox e Lavo) [7,8]

2. **Mecânico:** A energia é captada e armazenada sob a forma de energia cinética ou potencial. Geralmente são equipamentos de grande porte (Figura 7) como: ar comprimido, bombagem hídrica e volante de inércia [1, 6].
3. **Mecânico-químico:** É o sistema em que através de um processo mecânico, é desencadeado uma reação química nos elementos, permitindo posterior armazenamento. Em recente descoberta, que foi demonstrada em um artigo publicado em julho de 2022, este método realizou com sucesso a transformação de hidrogénio em estado gasoso para sólido (em pó) [10]. Isto é um feito de extrema importância e poderá marcar o início de uma revolução na indústria do hidrogénio verde e, eventualmente, na energia em geral.



Figura 7: Sistema de armazenamento mecânico por volante de inércia [9]

Atualmente, o armazenamento de hidrogénio é conseguido sob duas formas, em estado gasoso, através de tanques de alta pressão, ou, em estado líquido, através de temperaturas extremamente baixas. Em ambos os casos são necessárias grandes quantidades de energia, o que encarece inevitavelmente o seu armazenamento, criando um obstáculo para a disseminação do hidrogénio como fonte de energia.

A nova descoberta, realizada pelos pesquisadores da Universidade Deakin de Melbourne, o Dr. Srikanth Mateti e o Professor Ying Chen, demonstrou que é possível armazenar grandes quantidades de hidrogénio verde, em segurança e transportadas em estado sólido através de um custo reduzido de energia.

Este método, processa-se à temperatura ambiente e consiste numa câmara com pequenas bolas de aço inoxidável, hidrogénio em estado gasoso e pó de nitreto de boro. O processo dá-se com o movimento giratório da câmara, provocando a colisão das bolas com o pó e a parede da câmara, desencadeando uma reação mecânico-química, que resulta na “prisão” das moléculas de hidrogénio no pó (Figura 8).

Segundo o Dr. Mateti, o pó de nitreto de boro pode ser reutilizado várias vezes para realizar o mesmo processo de separação de gás, não gera desperdício e subprodutos, e não requer produtos químicos agressivos.

Apesar desta descoberta ter sido testada apenas em pequena escala, não deixa de ser bastante promissor, face aos resultados obtidos.

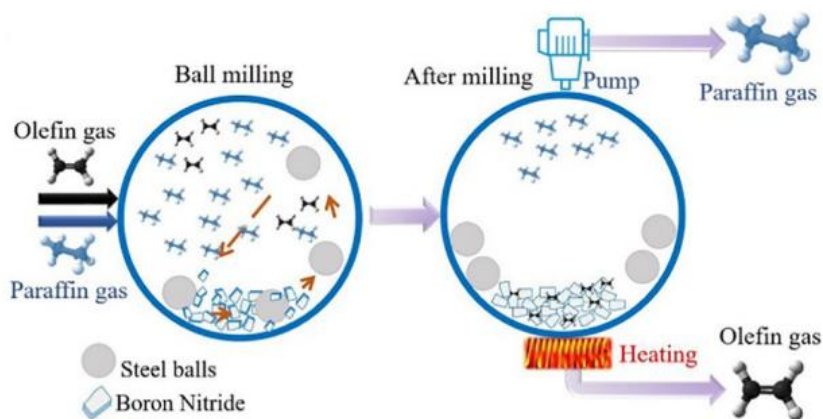


Figura 8: Processo de moagem de bolas para separação de gases [10]

4. Térmico: Através da energia eléctrica é gerado calor ou frio, podendo ser realizado sob a forma de calor sensível ou calor latente. Basicamente a definição tem que ver com a alteração ou não do estado do material durante a acumulação. Assim, calor sensível, é quando o material aquecido não muda de estado durante a fase de acumulação. Quando a energia é armazenada através da transformação de fase do material, o armazenamento é feito através de calor latente [1].

Atualmente, o armazenamento térmico é utilizado à escala do edifício, onde, por exemplo, a energia é armazenada através materiais de mudança de fase (PCM), bombas de calor e tanques de armazenamento (Figuras 9 e 10).



Figuras 9 e 10: Tanque de armazenamento de energia térmica da Solenco e bomba de calor da EDP [11,12]

5. Eletroquímico: É o sistema mais divulgado na utilização para pequena e média escala. São vários os equipamentos disponíveis no mercado, como: baterias primárias e secundárias, células de fluxo redox e células de combustível [6].

Os sistemas mais utilizados são as baterias recarregáveis, compostas por diferentes matérias-primas, como o Lítio-Íon (Figura 11), Chumbo-Ácido, Níquel-Zinco e Lítio-Ferro (Figura 12), substâncias com grande impacto ambiental na extração [13], incluindo cobalto e grafite, presentes no sistema.

Devido à sua composição, e ao seu impacto ambiental na sua mineração, estes sistemas estão a gerar alguma controvérsia, nomeadamente no sector da mobilidade, por estarem a ser adotados como se se tratasse de uma alternativa sustentável e não poluidora.



Figuras 11 e 12: Bateria Tesla Powerwall+2.0 [14] e BYD HVM 11.0 [15]

As baterias recarregáveis armazenam a energia durante um período curto, podem ter características distintas e variar na sua capacidade energética, profundidade de descarga e custos de investimento e manutenção. Geralmente são utilizadas para armazenar energia produzida através de fontes renováveis como, placas fotovoltaicas ou pás eólicas. Por vezes são utilizadas para eliminar a instabilidade de fornecimento da rede e alimentar por algumas horas ou dias uma habitação unifamiliar [14].

Contexto de armazenamento de energia em Portugal. O sistema de armazenamento de energia que atualmente mais se destaca em Portugal, com o objetivo de gerar energia elétrica, é o sistema mecânico por bombagem hídrica com uma capacidade instalada superior a 3GW. Contudo, importa ainda referir os seguintes sistemas:

- Um sistema mecânico por volante de inércia nos Açores;
- O projeto piloto de uma subestação de baterias de iões de lítio com potência de 500kW e capacidade de 360kWh em Évora, instalada pela EDP;
- Um sistema de baterias de iões de lítio na ilha Graciosa com potência de 7,4MW, e outro em

Porto Santo, com potência de 4MW, instalado pela EDA [13];

Aplicação

Tipologia da habitação. Relativamente às habitações, e segundo a Pordata [16], em sua Base de Dados Portugal Contemporâneo, verifica-se uma predominância da tipologia T3 nos edifícios construídos, que se caracteriza pela existência de 3 quartos numa unidade habitacional. Assim, para este estudo foram considerados os valores relativos a uma habitação com estas características.

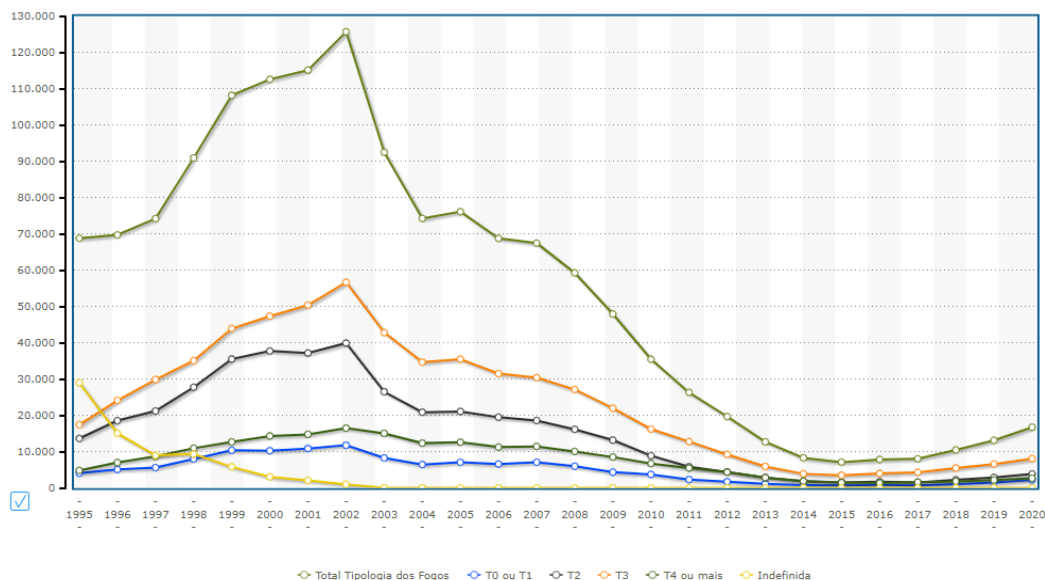


Figura 13: Fogos concluídos em construções novas para habitação familiar [16].

Sistemas. Foi realizada uma pesquisa de sistemas de armazenamento de energia disponíveis no mercado, de diferentes tecnologias, que permitissem responder às necessidades energéticas da tipologia mais predominante em Portugal, a T3, sem recorrer à rede elétrica.

A Tabela 1 a seguir apresenta o resumo das informações dos sistemas que mais se destacaram, e suas características mais relevantes encontradas nos sites, manuais e outros documentos dos produtos [14, 17, 15, 8].

Investimento. Para ser viável, o investimento num bem tem que gerar o retorno integral do capital inicial, com um excedente económico mínimo estabelecido pelo investidor. Geralmente, este investimento corresponde, no mínimo, à rentabilidade de alternativas de investimento com o mesmo risco existente no mercado.

Para esta análise económica, foi necessário identificar todos os fluxos de dinheiro (cash-flows) gerados pelo bem ou projeto ao longo do seu período de vida útil, como os valores de consumo da energia elétrica e preço da eletricidade.

Cabe destacar que os critérios de avaliação normalmente utilizados para medir o interesse económico dos projetos podem conter um risco associado. Existem vários fatores que influenciam o resultado e no qual levam à incerteza do seu valor futuro. Encargos de manutenção, impostos, e outras despesas indiretamente associadas, são alguns exemplos e, sobre os quais, não se tem qualquer tipo de controlo. Assim, relativamente ao cálculo efetuado, é adequado referir que se trata de uma previsão dos dados, necessários à análise dos sistemas do ponto de vista económico. A verificação da viabilidade económica percorreu as seguintes etapas:

1º passo: Cálculo do consumo médio (diário, mensal, anual) de energia elétrica de uma habitação T3. Para esta previsão, levou-se em conta os dados disponibilizados pela Selectra [18] e verificou-se a potência elétrica, em kW, de cada eletrodoméstico geralmente usado numa habitação, separados por ambiente, e o tempo aproximado, em horas, do uso mensal de cada um. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 2.

Tabela 1. Sistemas de armazenamento estudados com maior relevância

	Tesla Powerwall+2.0	Solenco Powerbox	BYD HVM 22.1	Lavo
Tecnologia	Bateria de Li-ion1	Hidrogénio	Bateria de LiFe2	Bateria de Li-ion e MH23
Uso	Residencial e comercial leve	Residencial, comercial e industrial	Residencial	Residencial e comercial leve
Quantidade de equipamentos	3 ou 4	1 ou 2	1 (+ inversor)	1 (+ inversor)
Máximo de unidades	10	-	3	Não cita quantas
Origem de fonte de energia	Rede e solar	Rede, solar e eólica	Solar	Solar
Uso de energia armazenada	Elétrica	Elétrica e térmica	Elétrica	Elétrica
Dimensões (LxAxP) [mm]	754x1595x160	1200x1800x800	585x2110x298	1240x1680x400
Vantagens sustentáveis	-	-	Sem cobalto	Não emite CO2 e usa metais recicláveis.
Desvantagens sustentáveis	-	-	-	Não reaproveita a H2O e o O2 usados.
Monitorização do sistema	Sim	Sim	Sim	Sim
Duração de armazenamento	Guarda de dia para usar a noite	Guarda por horas ou meses	-	Uso por até 2 dias
Capacidade energética [kWh]	13,5	48	22,08	40
Eficiência	97,50%	-	96%	50%
Potência elétrica Pico e Contínua	22 - 10kW 9,6 - 7kW	5kW	75A (30,72kW) 50A (20,48kW)	6,8kW 5kW
Valor do equipamento de armazenamento	\$ 11.500 (2022)	-	€ 12.540,00	\$ 29.450,00 (2022)
Valor dos painéis fotovoltaicos	\$ 12.096 (2022)	-	-	-
Vida útil estimada	Garantia de 10 anos	Mínimo de 25 anos	Garantia de 10 anos	30 anos
Ciclos	4.000	-	-	20.000

Tabela 2: Consumo médio total de energia elétrica numa habitação T3 em Portugal

Compartimento	Consumo médio kWh/mês
Cozinha/lavandaria	280,37 kWh/mês
Sala	50,70 kWh/mês
Quartos (3)	72,08 kWh/mês
Casas de banho (2)	86,82 kWh/mês
Total mensal	489,97 kWh/mês
Total diário (489,97 kWh/mês) / 30 dias = 16,30 kWh	16,30 kWh/dia

Com o consumo total mensal igual a 489,97 kWh, têm-se um consumo anual de 5879,64 kWh.

2º passo: Levantamento do preço da eletricidade para utilizadores domésticos dos últimos 30 anos

Recorreu-se à base de dados da Pordata [16] para a coleta dos registros dos preços da eletricidade para utilizadores domésticos dos últimos 30 anos (Tabela 3), pois foi considerado que há uma diferença de preços entre as várias empresas no mercado de eletricidade, e que o seu valor poderá igualmente oscilar dentro da mesma empresa mediante o pacote e a potência contratada.

Tabela 3: Média dos preços da eletricidade em Portugal para utilizadores domésticos (por kWh)

Período de 5 anos	Preço médio (€/kWh)	Diferença (€)	Percentagem (%)
1991 a 1995	0,1874	0	
1996 a 2000	0,1741	-0,0133	-7,09%
2001 a 2005	0,1642	-0,0099	-5,68%
2006 a 2010	0,1790	0,0148	9,01%
2011 a 2015	0,2582	0,0792	44,24%
2016 a 2021	0,2657	0,0075	2,90%

3º passo: Cálculo da média anual da diferença do preço da eletricidade

Utilizando os dados referidos dos últimos 30 anos, a sua média anual corresponde a de 0,0021 € ou 1,13% por ano.

4º passo: Previsão do preço kWh para os próximos 30 anos

Através dos preços obtidos na base de dados da Pordata [16], e considerando uma média de aumento de 0,0021 € por ano no valor do kWh, foi realizada uma projeção do preço da eletricidade para os próximos 30 anos (Tabela 4) para poder prever o total de gasto do consumo energético de uma habitação T3 neste período.

5º passo: Previsão do preço da eletricidade para os próximos 30 anos

Considerando o consumo anual calculado igual a 5879,64 kWh, conseguiu-se verificar o gasto previsto por ano num cenário dos próximos 30 anos (Tabela 4).

Tabela 4: Previsão do preço kWh para os próximos 30 anos e valor total do gasto no período

Ano	Preço previsto [€/kWh]	Gasto previsto do consumo anual [€]
2022	0,2472	1.453,45
2023	0,2493	1.465,79
2024	0,2514	1.478,14
2025	0,2535	1.490,49
2026	0,2556	1.502,84
2027	0,2577	1.515,18
2028	0,2598	1.527,53
2029	0,2619	1.539,88
2030	0,264	1.552,22
2031	0,2661	1.564,57

6º passo: Previsão do investimento total dos sistemas para 30 anos

Na Tabela 5 encontram-se os cálculos de uma previsão de investimento dos sistemas para os próximos 30 anos. Importa referir que, por não ter sido possível obter o valor de investimento do sistema Solenco Powerbox, este não foi considerado na análise efetuada.

Tabela 4: Previsão do preço kWh para os próximos 30 anos e valor total do gasto no período (Continuação)

Ano	Preço previsto [€/kWh]	Gasto previsto do consumo anual [€]
2032	0,2682	1.576,92
2033	0,2703	1.589,27
2034	0,2724	1.601,61
2035	0,2745	1.613,96
2036	0,2766	1.626,31
2037	0,2787	1.638,66
2038	0,2808	1.651,00
2039	0,2829	1.663,35
2040	0,285	1.675,70
2041	0,2871	1.688,04
2042	0,2892	1.700,39
2043	0,2913	1.712,74
2044	0,2934	1.725,09
2045	0,2955	1.737,43
2046	0,2976	1.749,78
2047	0,2997	1.762,13
2048	0,3018	1.774,48
2049	0,3039	1.786,82
2050	0,306	1.799,17
2051	0,3081	1.811,52
	Valor total previsto para o gasto em 30 anos	48.974,46

Tabela 5. Investimento total dos sistemas para 30 anos

	Tesla Powerwall+2.0	BYD HVM 22.1	Lavo
Investimento [un]	US\$ 11.500 x 0,93 € (a 26/05/22) = 10.695,00 €	12.540,00 €	A\$ 29.450 x 0,66 € (a 26/05/22) = 19.437,00 €
Cap. Energética [kWh]	13,50	22,08	40,00
N.º equipamentos (16,30 kWh/dia)	2	1	1
Cap. energética total [kWh]	27,00	22,08	40,00
Vida útil estimada	10	10	30
N.º de unidades para 30 anos	2 (unid. por 10 anos) x 3 = 6	1 (unid. Por 10 anos) x 3 = 3	1 unid.
Investimento final	10.695,00 € x 6 = 64.170,00 €	12.540,00 € x 3 = 37.620,00 €	19.437,00 €

Conclusão

O sistema de armazenamento de energia através do hidrogénio é o mais rentável economicamente, conseguindo, não só responder a uma necessidade diária, tal como os outros sistemas de baterias, como mensal. Este sistema tem a capacidade de armazenar a energia durante meses, permitindo, por exemplo, acumular a energia produzida através de painéis fotovoltaicos durante as estações do ano mais quentes, e utilizá-la nos meses mais frios, onde os períodos de sol são menores e o consumo energético maior.

Este estudo não contabilizou alguns gastos, como o custo do transporte do sistema de armazenamento, desde o local de produção até ao local da sua utilização, o custo do sistema de produção de energia, como os painéis fotovoltaicos, assim como a manutenção dos sistemas de produção de energia e de armazenamento. Contudo, verifica-se que a diferença entre o custo da energia em 30 anos (48.974,46€) e o investimento para 30 anos de um dos sistemas aqui estudados (19.437,00€) antevê a sua viabilidade económica. Tendo ainda em conta que estes sistemas são

recentes, pode-se desde já antecipar uma significativa redução no seu investimento inicial, aquando da sua estabilização no mercado global.

Para que o atual sistema económico transite para uma economia de baixo carbono, serão necessárias grandes mudanças no quadro energético. A produção e utilização de energia terá de ser orientada para a descentralização do abastecimento, acompanhada por uma profunda descarbonização da economia.

No entanto, e apesar da urgência na mudança de paradigma para a produção e consumo da energia, constata-se um enorme atraso na implementação de políticas e soluções capazes de responder à atual dependência energética.

Com este estudo, verificou-se que grande parte das tecnologias utilizadas nos atuais sistemas de armazenamento, são, na verdade, bem antigas, no entanto, devido aos investimentos dos últimos anos, foi possível constatar avanços significativos na criação de produtos e sistemas mais eficientes, contribuindo para o aparecimento de sistemas emergentes com grande potencial, e que a curto prazo poderão revolucionar o cenário energético mundial.

É importante, contudo, referir que se deverá ter algum cuidado, principalmente nesta fase inicial de transição energética, com a generalização de políticas, sistemas ou produtos, como resposta a um determinado problema. Esta questão é na verdade bastante complexa, porque nem todos os edifícios têm a mesma necessidade energética, nem os recursos naturais são iguais em todas as regiões, nem os recursos económicos são iguais em todos os países, etc. Assim, as medidas a adotar terão de ser sempre adequadas ao local, à região, ao tipo de edifício, à comunidade em questão, etc.

A perspetiva holística sobre as soluções a adotar é outro fator de grande importância para alcançar os objetivos e metas traçadas. Assim, e para os edifícios, deverão ser adotadas em primeiro lugar todas as opções e medidas passivas, para que a construção tenha um bom desempenho energético. Só depois deverão ser implementados os sistemas que irão colmatar as necessidades energéticas em falta.

Assim, e face ao exposto, pode-se afirmar que a solução para este problema energético passa inevitavelmente por um maior apoio financeiro no conhecimento e nas empresas dispostas a criarem produtos e soluções inovadoras.

Setores como a energia ou alimentação terão que ser repensados tendo em conta os efeitos negativos de um sistema global, dependente e poluidor. O “global” tem de dar lugar ao “local”, e isso irá alterar muitas dinâmicas e interesses já instalados. Produzir e consumir localmente garante não só a independência e autonomia, como também a estabilidade de um sistema mundial cada vez mais volátil e agressivo. Acredita-se que este tipo de estratégia, permitirá criar uma economia segura e próspera garantindo um sistema mais equilibrado e harmonioso.

Referências

- [1] PEREIRA, F. *Energy Storage Systems: (Sistemas De Armazenamento de Energia)*. Neutro à Terra, [S. l.], n. 12, (2013).
- [2] EUROSTAT. Eurostat: Your key to European Statistics, 2022. Data Browser – Energy dependence, ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/t2020_rd320/default/bar?lang=en, em 25/05/2022.
- [3] APREN. Associação de Energias Renováveis, 2022. Produção - Balanço da produção de eletricidade de Portugal continental em 2022, apren.pt/pt/energias-renovaveis/producao, em 25/05/2022.
- [4] EEA. European Environment Agency, 2022. Progress towards renewable energy source targets for EU-27, eea.europa.eu/data-and-maps/daviz/actual-res-progress-indicative-trajectory-12#tab-chart_6, em 26/05/2022.
- [5] Armazenamento de energia: A chave para um futuro descarbonizado. Iberdrola, iberdrola.com/sustentabilidade/armazenamento-eficiente-de-energia, 24/05/2022.

- [6] FERRÃO, Paulo *et al.* *Armazenamento de Energia em Portugal*, Relatório Final do Contrato ADENE-CPR-2020-001 entre a Universidade de Lisboa e a ADENE, 2020, observatoriodaenergia.pt/wp-content/uploads/2021/03/ESTUDO-ARMAZENAMENTO-DE-ENERGIA_Texto_Final_revisto-OBS-v2.pdf , em 02/04/2022.
- [7] Hidrogénio verde: O novo paradigma na produção de energia. O instalador, 2021, oinstalador.com/Artigos/365959-Hidrogenio-verde-o-novo-paradigma-na-producao-de-energia.html, em 24/05/2022.
- [8] LAVO. Lavo, 2022, lavo.com.au/wp-content/uploads/2020/10/LAVO%E2%84%A2-Residential-Unit-Brochure.pdf, em 12/05/2022.
- [9] EV1 CDU CASTIONE, Switzerland 027. Energy Vault, energyvault.com/photo-gallery, em 24/05/2022.
- [10] Mateti, Srikanth *et al.* *Superb storage and energy saving separation of hydrocarbon gases in boron nitride nanosheets via a mechanochemical process*, *Materials Today*, 57 (2022) 26-34. sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702122001614.
- [11] First hydrogen home in the netherlands. DeepResource, 2020, deepresource.wordpress.com/2020/05/04/first-hydrogen-home-in-the-netherlands/, em 12/05/2022.
- [12] Bomba de calor para água quente – NUOS-EVO-A-PLUS. Bimobject, bimobject.com/pt-br/ariston/product/NUOS-EVO-A-plus, em 12/05/2022.
- [13] Gomes, Diogo Aroso Peixoto Melo. *O papel do lítio na transição energética: perspetivas sociais sobre a sua exploração*, Dissertação (Mestrado em Estudos do Ambiente e da Sustentabilidade) – Instituto Universitário de Lisboa, Lisboa, 71 f., (2020).
- [14] TESLA. Tesla, 2022. Powerwall, tesla.com/powerwall, em 17/05/2022.
- [15] BYD. BYD – Battery Box, 2022. Downloads, bydbatterybox.com/uploads/downloads/220426%20BYD%20BatteryBox%20Premium%20HVS_HVM%20Datashet%20V1.6%20EN-626901613c1a0. Pdf, em 12/05/2022.
- [16] PORDATA. Pordata: Estatísticas sobre Portugal e Europa, 2021. Preços da eletricidade para utilizadores domésticos e industriais (PPS), pordata.pt/Europa/Pre%C3%A7os+da+electricidade+para+utilizadores+dom%C3%A9sticos+e+industriais+(PPS)-1479, em 06/05/2022.
- [17] Solenco Power, 2022. Solenco Powerbox, solencopower.com/powerbox, em 27/05/2022.
- [12] SELECTRA. Loja luz by Selectra, 2022. Como calcular o consumo médio: simulador do consumo de energia em kWh, lojaluz.com/faq/poupar-luz/consumo-medio, em 06/05/2022.

Impressão 3D de Edifícios

SANTOS Liliana^{1,a}, TOROXEL Julia^{1,b} e BRAGANÇA Luís^{1,c}

¹Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal.

^alilianasantos1989@hotmail.com, ^bjuliatoroxel@hotmail.com, ^cbraganca@civil.uminho.pt

Palavras-chave: Impressão 3D, Manufatura Aditiva, Automação da Construção, Betão Impresso.

Resumo. O setor da construção procura constantemente a modernização de processos e a obtenção de melhores padrões de qualidade e eficiência de edifícios, através do recurso a tecnologias mais avançadas. Neste âmbito, o presente trabalho consiste na revisão do estado da arte acerca da tecnologia de impressão 3D de edifícios com o intuito de identificar quais benefícios esta pode agregar ao setor. A impressão 3D de edifícios está a ser testada em diversos países, apresentando vantagens promissoras como a rapidez da construção, a redução de recursos, a mitigação do erro humano e de acidentes de trabalho e ainda a redução de resíduos. Contudo, tratando-se de uma tecnologia emergente, a mesma ainda apresenta diversas barreiras, como a escassez de normalização e a incompatibilidade com os processos de avaliação do desempenho aplicados a sistemas construtivos tradicionais. No que diz respeito aos custos, reconhecem-se benefícios ao nível da construção em escala, porém, em termos de edifícios isolados, estas vantagens carecem de uma análise mais aprofundada. Desta forma, apesar da tecnologia se apresentar promissora e algumas de suas vantagens serem já evidentes, reconhece-se que estudos acerca do tema precisam ser suficientemente desenvolvidos para que a técnica possa vir a ser consolidada no setor construtivo.

Enquadramento e Objetivos

O setor construtivo tem-se mantido, através das décadas, atrelado a processos construtivos tradicionais desenvolvidos há muitos séculos. Buswell et al. [1] argumenta que por volta de 100 a.C. o betão foi criado pelos romanos e, 2200 anos mais tarde, este continua a ser manuseado e aplicado quase da mesma forma – através da mão de obra humana. Apesar de grandes avanços tecnológicos já terem sido alcançados ao nível da mistura e preparo do betão, tornando-o mais eficiente e resistente [2, 3], muito pode ainda ser desenvolvido acerca do processo construtivo em si. Neste contexto, o estudo e desenvolvimento da industrialização e automação da construção mostra-se tendência crescente por proporcionar padronização dos processos e consequente melhoria na qualidade, eficiência e velocidade da construção, aliados à sustentabilidade.

A técnica de impressão 3D tem sido testada em diversos países na construção de edifícios [4], apresentando vantagens promissoras principalmente no que diz respeito à redução de recursos e na possibilidade de atingir a melhoria na performance das construções através do uso de uma geometria inteligente e complexa [1]. Muitos veem na tecnologia a possibilidade de combater a crise habitacional existente em diversos países, através da construção de moradias de qualidade de forma rápida, eficiente e económica [5].

O presente trabalho busca reunir informações pertinentes na literatura existente acerca da impressão 3D de edifícios, as suas características técnicas, os custos envolvidos, as tecnologias já existentes no mercado e seu potencial de desenvolvimento. Para entender de forma objetiva os impactos ambientais atrelados à técnica em questão, foi realizado ainda uma breve análise de ciclo-de-vida comparando esta ao sistema construtivo em alvenaria estrutural, com o auxílio da ferramenta One Click LCA.

Descrição do sistema construtivo e características gerais

Atualmente, a manufatura de produtos através da impressão 3D é prática recorrente e estabelecida em diversas áreas da economia, sendo a técnica amplamente utilizada nos setores de saúde, aeroespacial, arquitetura, engenharia e design. A técnica consiste na manufatura – a partir de modelos digitais – de produtos tridimensionais com auxílio de máquinas de impressão especializadas. O método mais recorrente de impressão 3D é por extrusão [6], onde o material a ser impresso é extrudido pelo bocal da máquina formando camadas sucessivas e sobrepostas, até a formação do produto final. Tal processo é chamado de manufatura aditiva.

No âmbito da arquitetura e engenharia, os esforços mais recentes têm buscado ir além do já recorrente uso da impressão 3D na produção de protótipo e modelos em escala reduzida. O foco atual é o desenvolvimento da técnica para o uso construtivo propriamente dito, empregando-a na impressão de elementos em escala real e maiores dimensões. Paredes, coberturas e estruturas inteiras de um edifício podem ser impressas através da técnica, sendo as misturas de base cimentícias, designadas 3DPC (*Three Dimensional Printable Concrete*), o material mais comumente utilizado [4].

Comparando à com processos construtivos tradicionais em betão, o uso do 3DPC na construção apresenta diversas vantagens, como maior rapidez construtiva e redução de recursos, por se tratar de um processo automatizado. A dispensa do uso de cofragens e a facilidade e maior liberdade na construção de edificações com designs complexos também diferenciam a técnica de outros sistemas construtivos que utilizam o betão.

Diferentemente do betão moldado tradicionalmente, o 3DPC tem características anisotrópicas e menos homogeneidade. A qualidade do elemento impresso vai depender não só da sua forma, da mistura cimentícia utilizada e do processo de cura – a direção de impressão das camadas e o tempo decorrente entre a impressão destas também são parâmetros primordiais para o bom desempenho das construções impressas.

Design dos elementos impressos. As formas complexas e orgânicas são características recorrentes nas edificações impressas. O sistema permite explorar designs diferenciados sem que isto torne o processo mais complexo, diferentemente do que ocorre em sistemas construtivos tradicionais, onde a execução de tais formas complexas, no geral, implica tornar o processo mais caro e moroso. Entretanto, é curioso notar que edificações com planta ortogonal são as que aparecem em maior número, também no âmbito da impressão 3D [4].

Para além da morfologia da edificação como um todo, a estrutura interna dos elementos impressos também são objeto de análise. No caso das paredes, estas geralmente são formadas por dois filamentos paralelos, constituindo as suas faces interna e externa, e têm o seu interior parcialmente preenchido com uma trama de filamentos que é impressa em simultâneo às faces (Figura 1). Esta trama contribui para a estabilidade e resistência da estrutura, tanto durante a impressão quanto após o elemento endurecido [7] e o resultado final são paredes mais leves, erguidas com menor quantidade de material. Os vazios existentes podem ser usados para instalação de rede elétrica, hidráulica ou isolamento, bem como serem preenchidas com armaduras e betão, onde, neste último, a parte impressa da parede desempenha também o papel de cofragem permanente.

Tipologias de edifícios impressos e elementos construtivos. Até momento atual, dentre os projetos executados, observa-se o maior emprego da técnica para a impressão de habitações unifamiliares térreas, com dimensões modestas [4]. Tal resultado pode ser uma boa representação da motivação defendida pelos maiores desenvolvedores, construtores e empresários do ramo, que veem na técnica uma solução para a existente crise habitacional presente em todos os continentes. Eles argumentam que a impressão 3D pode proporcionar a construção em massa de moradias de qualidade, com o uso significativamente reduzido de recursos [5]. Para além da tipologia citada, outros projetos – pavilhões de exibição, hotéis, escritórios, pontes pedonais – já foram executados, bem como construções em altura, como o edifício habitacional de 5 andares finalizado em 2015 na China, que empregou a técnica de impressão 3D em conjunto com o betão armado convencional.

Todos os elementos de uma edificação podem ser impressos, das estruturas à cobertura. As paredes são, entretanto, os elementos mais recorrentemente construídos utilizando a técnica [4].



Figura 1: Complexidade da trama interna de uma parede impressa. Fonte: Gosselin et al., 2016.

Características e componentes das misturas cimentícias. As misturas cimentícias para impressão devem apresentar consistência que permita uma boa trabalhabilidade e boa construtibilidade. A primeira, garante que a mistura consiga ser bombeada através do sistema e ser extrudada de forma consistente e uniforme através do bocal da impressora. A segunda, garante a estabilidade das camadas inferiores e sua capacidade de suportar as camadas sucessivas, sem que o filamento ceda. De forma geral, pode-se dizer que a mistura para impressão deve combinar as características do concreto projetado, que tem capacidade de ser bombeado, com características do concreto auto-compactável, que dispensa o processo de vibração para seu bom assentamento e que, no caso impresso, pode proporcionar boa trabalhabilidade e aderência entre as camadas [8].

Por carência de literatura suficiente quanto a mistura de betões e argamassas ideais para a impressão, o método geralmente usado é o de tentativa e erro, partindo de uma mistura cimentícia usual (com razão água/ligante em torno dos 0,35), adaptando-a até que esta apresente uma textura contínua e uniforme ao ser extrudada. Alguns autores defendem misturas com razão água/ligante com valores próximos aos usuais [9]. Outros, entretanto, defendem misturas com razão A/L mais baixas, por volta de 0,26, para a obtenção de misturas cimentícias de alto desempenho, com resistência à compressão superior a 100 MPa [8]. Há ainda contradições de estudiosos que condenam o uso do betão de alto desempenho para impressão, devido às suas propriedades reológicas e de endurecimento inadequadas [10]. Tal ausência de consenso encontrada na literatura existente sobre 3DPC evidencia o estado de exploração atual da tecnologia que é relativamente recente, onde os diversos cenários e possibilidades ainda estão em fase de teste e aperfeiçoamento.

Quanto à presença de fibras na mistura, em sua maioria poliméricas, estudos defendem sua importância na composição do 3DPC. Além de melhorar sua resistência, tópico que será abordado mais adiante, estas são essenciais para controlar a fissuração causada pela retração durante o processo de cura do elemento impresso, fenômeno que aqui é agravado pela ausência de cofragem no processo construtivo [10].

Velocidade, direção e tempo de impressão das camadas. A velocidade com que o bocal opera durante a impressão, a direção que este percorre e o tempo decorrido entre as camadas que vão sendo sucessivamente construídas são outros parâmetros que exercem grande influência sobre a qualidade do produto impresso final. Para que o filamento extrudado mantenha uma textura consistente, é necessário que haja uma coordenação entre a velocidade de operação da impressora e o comportamento reológico do material impresso [11], de forma a minimizar a quantidade de falhas e vazios no interior do filamento.

Segundo um estudo realizado em 2022 [9], o material impresso apresenta desempenhos variados dependendo da direção da impressão do filamento, resultado das características anisotrópicas intrínsecas ao 3DPC. Testes mecânicos realizados em provetes retirados de diferentes faces de uma parede impressa (Figura 2) mostram que o desempenho daqueles tende a ser melhor no eixo paralelo à direção de impressão dos filamentos (eixo Y mostrado na Figura 2,) e inferior nos eixos perpendiculares à mesma (eixos X e Z, mostrados na Figura 2).

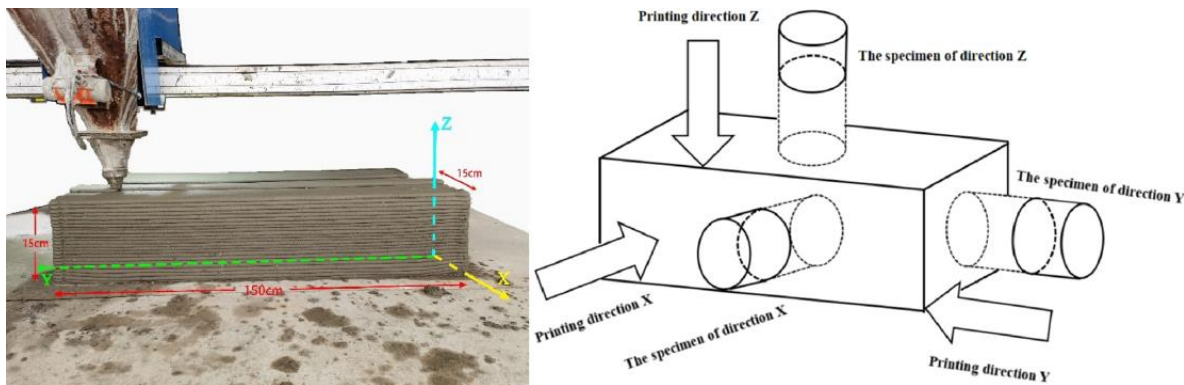


Figura 2: Parede de betão impressa (esquerda) e provetes retirados de cada face desta, correspondentes aos eixos de impressão X, Y e Z (direita). Fonte: Mo et al., 2022.

Por fim, o tempo de impressão entre as camadas e, conseqüentemente, a capacidade de aderência entre estas é também importante para garantir a resistência do elemento impresso. Se por um lado um betão de cura rápida vai favorecer o processo de impressão no que diz respeito à sua reologia controlada e à capacidade de suportar melhor as camadas subsequentemente impressas, uma cura ou enrijecimento demasiadamente rápidos podem resultar no enfraquecimento da ligação entre estas camadas, comprometendo o desempenho do elemento como um todo [12].

Resistência mecânica. Devido às propriedades anisotrópicas do betão impresso, testes de resistência mecânica devem ser realizados em diferentes orientações em relação à direção de impressão das camadas (Figura 3), o que induz, geralmente, a resultados de desempenho diferenciados de um mesmo elemento impresso.

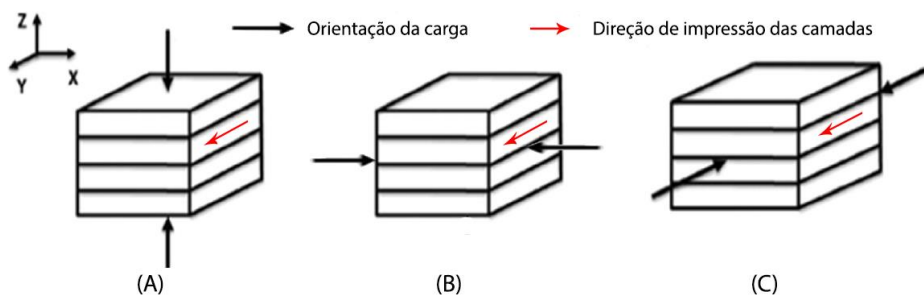


Figura 3: Orientação da carga em relação a direção de impressão das camadas. Fonte: autoras, 2022.

Quanto à compressão, de forma geral, o 3DPC apresenta redução de resistência em relação ao betão moldado tradicionalmente. Segundo um estudo de 2012 [8], esta redução pode ser de até 30% em elementos impressos em formas curvilíneas e entre 5-15% em elementos impressos de forma linear, variação dependente da orientação da carga em relação à direção de impressão. A resistência tende a ser mais próxima à do betão moldado tradicionalmente quando a orientação da carga é paralela à direção de impressão (Figura 3 C), seguido da resistência a cargas perpendiculares superiores (Figura 3 A). A resistência mais baixa se dá quando a orientação é perpendicular (lateral) à direção de impressão (Figura 3 B).

Estudos afirmam que a densidade do betão impresso é ligeiramente superior que a do betão moldado tradicionalmente, sendo a densidade do primeiro por volta de 4,5% superior ao último [8, 13]. Tal resultado é decorrente da pressão causada pelo bocal sobre o filamento durante a impressão, fator que resulta na redução de vazios entre camadas.

Quanto aos esforços de flexão e tração, o desempenho do 3DPC está diretamente ligado à presença de fibras na mistura e à orientação destas [14]. As fibras – em sua maioria poliméricas – quando presentes no 3DPC, tendem a seguir a direção da impressão, apresentando-se alinhadas em decorrência do processo de extrusão [6]. Com isso, o 3DPC apresenta melhor desempenho à flexão quando a carga é perpendicular e vertical (Figura 3 A) à direção de impressão, i.e., das fibras. Já em relação à resistência à tração, observa-se um desempenho melhor no 3DPC quando as cargas são paralelas à direção de impressão (Figura 3 C), decorrente da ductilidade proporcionada pelas fibras [13].

O principal ponto fraco encontrado no betão impresso é a região de interface entre camadas. Segundo um estudo de 2019 [15], o processo de manufatura aditiva por extrusão induz a presença de poros e falhas alongados entre os filamentos. Este processo impede, ainda, que as fibras da mistura sejam capazes de se conectarem nas regiões entre camadas sobrepostas [6], comprometendo a resistência do elemento a esforços horizontais, semelhantes aos gerados por ventos fortes e sismos.

Vale ressaltar, por fim, que para se realizarem testes de resistência mecânica no 3DPC endurecido, o ideal é que provetes para testes sejam extraídos de um elemento impresso maior. Tais provetes precisaram então ser cortados e ter suas faces polidas para adequarem-se às proporções e características padrão de corpos de prova. Tal processo pode induzir estresse adicional sobre estes provetes antes da realização dos testes, o que pode culminar em resultados desfavoráveis ao 3DPC frente ao betão moldado tradicionalmente, mesmo que ambos corpos de prova sejam produzidos a partir da mesma mistura cimentícia [16].

Desempenho acústico e térmico

A liberdade construtiva encontrada no 3DPC possibilita a implementação do design bio-mimético na arquitetura, onde mecanismos encontrados em sistemas biológicos são reproduzidos e combinados a tecnologias modernas de construção a fim de criar estruturas mais eficientes [7]. A reprodução de complexas estruturas celulares, treliçadas ou em espiral, amplamente encontradas na natureza, podem ser reproduzidas com o intuito de alcançar um melhor desempenho não só estrutural, bem como térmico e acústico nas edificações.

Gosselin et al. [7] escreve que o fluxo de calor em um elemento estrutural pode ser reduzido ao diminuir a secção transversal do seu elemento de maior condutibilidade térmica (neste caso, o betão), procurando reduzir ao máximo as pontes térmicas. Ou seja, quanto menor contato o pano exterior tiver com o pano interior de uma parede, menor vai ser o fluxo de calor nesta, e maior será sua capacidade de isolamento térmico. Tal característica é encontrada nas paredes em 3DPC que apresentem interior totalmente vazado ou apenas semipreenchido com trama impressa. Pessoa et al. [17] complementa, dizendo que interior vazado destas paredes podem ainda ser preenchidos com materiais isolantes térmicos, havendo inclusive a possibilidade d'estes serem impressos em simultâneo ao betão, através de um bocal extra.

Paralelamente à geometria e à adição de camadas isolantes térmicas nas paredes, há ainda a possibilidade de adaptar a mistura cimentícia a fim de reduzir sua condutibilidade térmica, através do acréscimo de aerogéis, agregados de argila expandida de baixa granulometria (tamanho máximo de 10 mm) ou adjuvantes introdutores de ar [17]. A adição deste último resulta na obtenção de um betão aerado (*foamed concrete*) que apresenta desempenhos térmicos e acústicos melhorados. Além de ser alcançado em paralelo com a melhoria do desempenho térmico do 3DPC, o bom comportamento acústico dos elementos impressos também pode ser obtido através da exploração de designs complexos e multifuncionais. A estrutura apresentada por Gosselin et al. [7], por exemplo, é formada por elementos elípticos com orifícios de tamanho e disposição variados capazes de absorver e atenuar ondas sonoras de comprimentos diferentes.

Disponibilidade e custos

São vários os fatores que influenciam os custos no setor da construção, nomeadamente materiais, mão-de-obra, equipamentos, prazo de execução, produtividade e escala da produção.

A título de exemplo, na construção convencional em betão armado, existe ainda o fator cofragem, que representa uma elevada percentagem nos custos da estrutura, podendo ultrapassar os 50%.

Relativamente à manufatura aditiva, são evidentes os benefícios em termos de produtividade e prazo de execução, conduzidos pela automatização do processo. Por outro lado, a impressão 3D em betão, dispensa a necessidade de cofragem, o que implica uma redução significativa de recursos, tanto materiais quanto humanos. Por fim, verifica-se a mitigação de desperdícios.

Contudo, há vários parâmetros a serem considerados na análise de custos deste sistema inovador: o custo de aquisição ou aluguer da impressora, transporte para o estaleiro da obra, consumo de energia, a mão-de-obra qualificada nas diferentes fases do projeto, o custo do material, quando se considera betão com adições e a escala do projeto.

De seguida referem-se alguns exemplos de projetos e estudos realizados, que comparam os custos da manufatura aditiva com a construção convencional de cada região. Contudo, estes apresentam uma abordagem pouco conservadora, o que pode fornecer uma visão demasiado otimista dos custos efetivos deste sistema construtivo.

Tabela 1: Projetos e estudos executados - Análise de custos. Fonte: autoras, adaptado de [18, 19, 20], 2022.

Descrição do projeto	Área (m ²)	Custo global (€)	Custo /m ² (€)	Entidade	Local	Data	Observação
Escritório da Dubai Future Foundation	250	142.556,00	570,00	Winsun	Dubai	2016	Redução em 50% do investimento
Moradia geminada	90	47.680,00	530,00	Investigadores do Reino Unido	Reino Unido	2018	Redução em 39% do investimento
Vila de habitações sociais (moradias unifamiliares)	46,5	4.582,00	99,00	ICON em parceria com a New Story	México	Em curso	Redução em 30% do investimento
Moradia unifamiliar isolada	38	10.183,00	268,00	ApisCor	-	-	Redução em 39% do investimento



Figura 4: Escritório da Dubai Future Foundation.
Fonte: designworldonline.com



Figura 5: Habitações impressas em 3D no México.
Fonte: dwell.com

Dos casos de estudo acima, conclui-se que a redução de custos de uma construção convencional para a tecnologia de impressão 3D pode variar entre 30% e 50%. Contudo verifica-se que os preços são dispares e variam de projeto para projeto, mediante fatores como o tipo de equipamento utilizado, a área da edificação ou a escala do projeto.

Relativamente aos preços do equipamento (impressoras 3D) e segundo dados da COBOD [21], a título de exemplo, os preços do seu modelo de impressora mais flexível (BOD2), variam entre 180.000,00€ e mais de 1 milhão de Euros. Sendo que, as impressoras mais comuns variam entre 300.000,00€ e 500.000,00€.

Portanto, os fatores que podem ser considerados um entrave à evolução e implementação desta tecnologia é o investimento inicial, já que requiere maquinaria dispendiosa, mão-de-obra qualificada, manutenção, transporte e armazenamento.

Outro aspeto importante é a contribuição dos aditivos químicos no custo do material, que é muito maior no caso de misturas de betão imprimíveis em 3D, do que nas misturas do betão convencional, uma vez que as primeiras devem satisfazer um extenso conjunto de indicadores de desempenho devido ao processo de impressão por extrusão. Assim, o betão de impressão 3D tende a ser mais caro. Portanto, são necessários aditivos químicos mais económicos para reduzir o custo das misturas.

Quanto aos custos de mão de obra, verifica-se que a manufatura aditiva exige uma carga de pessoal reduzida, variando em equipas de 2 ou 3 trabalhadores operando com a máquina de

impressão, contudo essa mão de obra exige-se qualificada, portanto, menos disponível no mercado atual.

Elementos como as fundações, instalações técnicas, pintura e acabamentos não estão incluídos no âmbito da impressão 3D, pelo que esses custos permanecem iguais ao da construção convencional.

Por vezes arquitetos e engenheiros idealizam e projetam geometrias e estruturas diferenciadas e complexas, que revelam baixa viabilidade de materialização segundo os sistemas convencionais de construção. No caso da manufatura aditiva, este deixa de ser um problema, uma vez que existe uma grande flexibilidade de design.

Verifica-se que a impressão 3D tem sido aplicada em projetos piloto, de divulgação e a maioria com carácter social, que pela sua escala, apresentam efetivamente vantagens a nível económico, uma vez que o custo da mobilização e operação do equipamento de impressão é tanto mais rentabilizado quanto maior o número de edificações construídas.

Interdependências tecnológicas

A manufatura aditiva apresenta como interdependências tecnológicas o equipamento de impressão (impressora 3D), que por sua vez necessita de energia monofásica ou trifásica para operar, a unidade de mistura e bombagem do material cimentício e ainda um sistema informático e software específico de cada fabricante, que permite a produção do modelo 3D e especificações detalhadas do projeto. Apresenta-se, de seguida, uma tabela resumo de alguns modelos de impressoras atualmente no mercado, que diferem em tamanho, forma e características técnicas, mas que permitem a impressão in situ das edificações.

Tabela 2: Modelos e características de impressoras. Fonte: autoras, adaptado de [20, 21, 22] 2022.

Fabricante	ICON	ApisCor	COBOD
Modelo da impressora	Vulcan	Frank	Bod 2
Largura total	14.20 m	-	-
Altura total	4.70 m	-	-
Peso	4309 Kg	1315 Kg	-
Voltagem	230/240V (monofásica)	-	32A, 400V (trifásica)
Altura máxima de impressão	3.20 m	6.40 m	8.10 m
Largura máxima de impressão	11.10 m	Infinito	14.60 m
Comprimento máximo de impressão	Infinito	Infinito	Infinito
Área de impressão máxima	Infinito	Infinito	Infinito
Velocidade máxima de impressão	13 – 25 cm/seg	-	100 cm/seg
Software	BuildOS	-	Cobod Slice, third party slicers
Mistura e bombagem de materiais	Sistema Magna	-	-
Betão requerido	Lavacrete	-	-
Tempo de configuração do equipamento	-	30 min	4 – 6 Horas
Tempo de desmobilização	-	-	3 – 4 Horas
Número de operadores necessários	2	2	2



Figura 6: Impressora Vulcan.

Fonte: iconbuild.com/vulcan



Figura 7: Impressora Frank.

Fonte: apis-cor.com



Figura 8: Impressora BOD 2.

Fonte: cobod.com

VULCAN

Design inovador e compacto, de relativa facilidade de transporte, mas que se limita à impressão de edifícios de apenas 1 piso. Para mistura e bombagem do material, é utilizado o sistema Magma, que alimenta a impressora, com o material designado Lavacrete, misturando-o automaticamente com aditivos e água, dependendo das condições climáticas do local.

Lavacrete, é um material que utiliza Cimento Portland e aditivos especiais, o que dispensa o acabamento com argamassa e protege as paredes contra bactérias e fungos. Com resistência de 41 MPa, este betão também cria estruturas resistentes a eventos extremos, como sismos e tornados [22].

FRANK. Tanto a impressora Frank, como a unidade de mistura “Gary” (operam em conjunto) podem ser facilmente transportadas por caminhão, pelo seu peso e dimensões reduzidas. Já dentro do próprio estaleiro, podem deslocar-se remotamente ou por “joystick”, em todo o tipo de terreno, por possuírem sistema de lagartas.

Permite a execução de edifícios até 2 pisos e o material de base cimentícia utilizado, apresenta uma resistência à compressão de 24MPa [20].

BOD2. Impressora modular, que se adapta aos tamanhos e formas das estruturas e que permite a impressão de edifícios até 3 pisos. Com 2 câmaras montadas no cabeçote de impressão, é possível monitorizar constantemente a impressão, através dos dispositivos de controlo [21].

Potencial de desenvolvimento

Os avanços verificados a nível de robótica, software e organização estão na base de uma nova era na construção, a da automação do setor. Isto só é possível com o esforço conjunto de universidades, governo e indústria [23]. Os projetos de construção mais ambiciosos usam tecnologias de construção avançadas devido à maior produtividade, segurança e menor complexidade de logística e gestão de projetos. Porém, a atual onda de automatização de processos impõe uma mudança de paradigma na educação, formação e sensibilização de técnicos e consumidores em geral.

Apesar da crescente aposta no processo de manufatura aditiva, a sua utilização ainda é limitada e existe um longo percurso até que possa ser amplamente aplicada no setor [24]. Esta pode ser considerada uma tecnologia promissora e com potencial de sustentabilidade e ecologia, por prezar pela otimização estrutural e pela redução do uso de material. No entanto, ainda são poucos os estudos focados na avaliação da sustentabilidade de misturas de betão imprimíveis em 3D.

Relativamente aos equipamentos (impressoras) e interdependências tecnológicas, é fundamental que estas se tornem mais disponíveis, mais rápidas, económicas e sustentáveis [25].

Relativamente aos aditivos químicos, é emergente um desenvolvimento e pesquisa profundos, para que se obtenham materiais mais viáveis economicamente e menos poluentes. A utilização de materiais mais sustentáveis na manufatura aditiva, como terra, agregados reciclados, ligantes com menor teor de cimento Portland, deve ser uma aposta contínua do setor.

É importante apostar ainda na compatibilização entre a metodologia BIM (Building Information Modeling) e a tecnologia de impressão 3D, uma vez que esta sinergia trará inúmeras vantagens a todas as fases de um projeto de construção [26].

Verifica-se, por fim, que a tecnologia 3DPC demonstra grande potencial de desenvolvimento futuro e implementação a nível global, carecendo, contudo de fortes apostas em investigação, financiamento e educação dos técnicos e consumidores no geral.

Caso de estudo e análise de ciclo-de-vida

A fim de comparar de forma objetiva os impactos ambientais do 3DPC em relação a métodos construtivos tradicionais, realizou-se uma breve análise de ciclo-de-vida com auxílio da ferramenta *One Click LCA*. Para esta análise, considerou-se o sistema de alvenaria estrutural em blocos de betão como sistema de referência, pelo fato de ambos exercerem as mesmas funções na construção – tanto estrutural quanto de vedação. Suas dimensões e características físicas podem ser igualmente

correlacionadas, com espessuras similares e interior parcialmente preenchido com armaduras e grout (Figura 9).

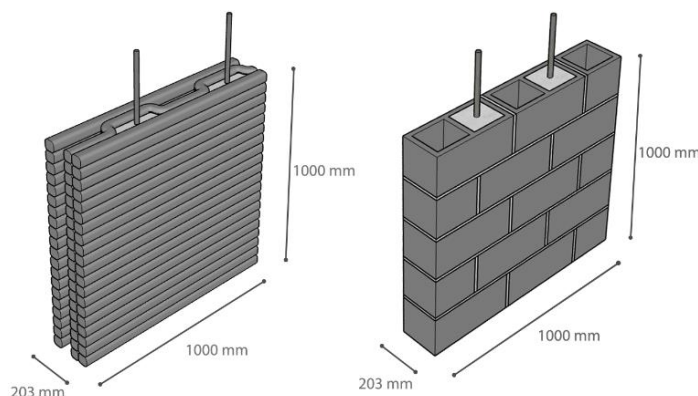


Figura 9: Padrões de paredes em 3DPC (esquerda) e em alvenaria estrutural (direita) considerados na análise. Fonte: autoras, 2022.

Com intuito de alcançar resultados de análise de ciclo-de-vida fiáveis, considerou-se o padrão de parede impressa desenvolvido pela empresa estadunidense *Apis Cor*, que constrói edificações em 3DPC que se adequam às normas aplicadas às construções em CMU (alvenaria estrutural) no país. Calculou-se então o quantitativo de material correspondente a 1m² de parede para cada sistema, listado na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3: Lista de quantidade de materiais por sistema construtivo. Fonte: autoras, 2022.

Material	Betão simples (2100 kg/m ³)	Aço (7850 kg/m ³)	Argamassa de preenchimento (1600 kg/m ³)	Argamassa de assentamento (1600 kg/m ³)	Bloco de alvenaria estrutural em betão (17 kg/unidade)
Unidade	kg	kg	m ³	m ³	kg
Quantidade 3DCP	315	15,7	0,025	-	-
Quantidade CMU	-	21,58	0,068	0,011	212,5

Quanto às fronteiras da análise, o tempo de vida útil apontado para ambos sistemas foi de 50 anos. Já os estágios de ciclo-de-vida considerados no cálculo foram de Produção e Transporte (A1-A4) e Fim-de-vida (C1-C4) [27]. Considerou-se Portugal como a localização da análise, de onde os inputs acerca do mix energético utilizado na manufatura dos materiais e a distância de transporte destes entre fábrica e estaleiro de obra foram inseridos por defeito pela ferramenta *One Click LCA*, com base nos dados relativos ao país em questão.

Resultados da análise de ciclo de vida

O resultado da análise de ciclo-de-vida realizado constatou que as emissões de CO₂ (referente a categoria GWP - potencial de aquecimento global) relacionados com a alvenaria estrutural são mais de 1,5 vezes superiores aos relacionados com 3DPC, sendo este responsável por uma emissão correspondente a aproximadamente 65% do total de emissões do sistema anterior. Os resultados relativos às demais categorias de impacto ambiental [27], sendo estas: potencial de acidificação (AP), potencial de eutrofização (EP), depleção da camada de ozônio (ODP), oxidação fotoquímica (POCP), uso total de energia primária e armazenamento biológico de CO₂, podem ser observados na Figura 10.

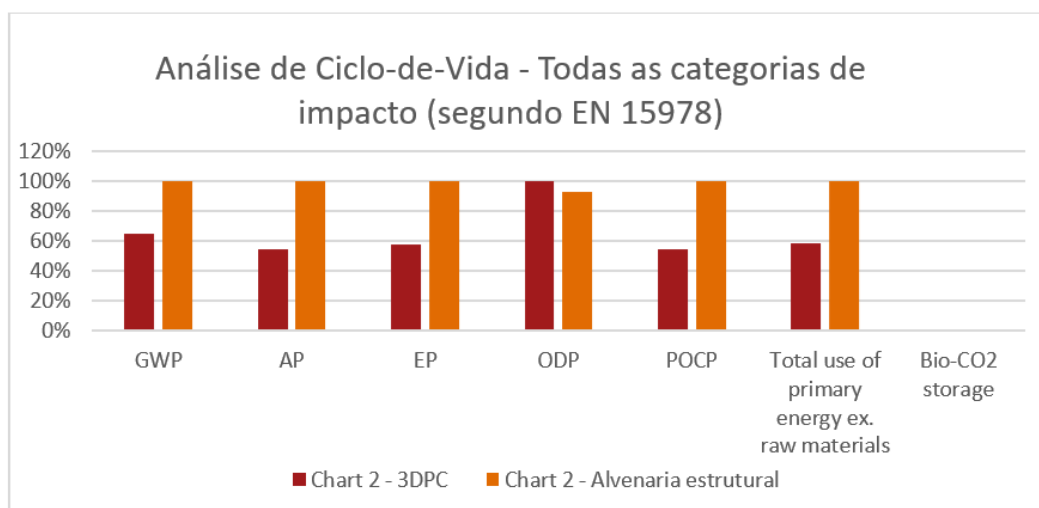


Figura 10: Resultado da análise de ciclo-de-vida comparativa relativa entre 3DPC e Alvenaria estrutural. Fonte: autoras, 2022.

A quantidade consideravelmente maior de argamassa utilizada no sistema de alvenaria estrutural comparativamente ao 3DPC, bem como a maior quantidade de aço utilizado no primeiro em relação a este último são fatores decisivos para o resultado positivo da técnica construtiva de impressão 3D na presente análise.

Entretanto, vale ressaltar que, por tratar-se de uma análise simplificada, alguns fatores não foram abrangidos no cálculo. Por exemplo, os encargos relativos ao transporte da máquina de impressão até o local de obra não foram calculados, e tratando-se de uma tecnologia em ascensão, o equipamento provavelmente teria de ser importado do exterior. Assim, a condição de tecnologia emergente e a consequente dificuldade de acesso a esta são fatores que podem tornar o uso da impressão 3D atualmente inviável em boa parte do globo, principalmente no âmbito de construções isoladas, em pequena escala.

Conclusões

A tecnologia de impressão 3D aplicada à construção, está ainda numa fase inicial e carece de desenvolvimento. Verifica-se, no estado da arte, muita contradição entre pesquisadores e os resultados são por vezes inconclusivos.

Por outro lado, não existe ainda regulamentação aplicável, o que dificulta o processo de verificação e controlo de qualidade das estruturas impressas. Embora sejam efetuados ensaios laboratoriais para verificação das características mecânicas do material, estes são ainda complexos e são por vezes pouco fidedignos.

Verificou-se ainda uma lacuna nas pesquisas relativas a outras características técnicas deste tipo de estruturas: resistência ao fogo, desempenho térmico, acústico e consequentes indicadores de durabilidade.

Contudo, a impressão 3D de edifícios apresenta já vantagens evidentes, nomeadamente a redução dos prazos de execução, da necessidade de mão de obra e de recursos materiais, a mitigação de erro humano e de desperdício de material e o aumento da segurança no contexto de obra, além da possibilidade de construção de estruturas geometricamente mais complexas e eficientes.

Relativamente à análise económica, vários estudos e projetos apontam para uma vantajosa redução de custos comparando a manufatura aditiva com os métodos convencionais de construção, podendo variar entre 30% e 50%. O que se considera uma visão muito otimista.

Porém, existem parâmetros que devem ser tidos em conta: os custos de aquisição e mobilização do equipamento, a necessidade de mão de obra qualificada, a escala do projeto e os custos das atividades que continuam a ser executadas pelos métodos tradicionais.

Ainda assim, é evidente que a maior procura exigirá maior competitividade na oferta e os equipamentos tornar-se-ão mais acessíveis técnica e economicamente. Nessa data, certamente esta

será uma tecnologia promissora, que pode revolucionar o setor e ser um importante recurso na procura por solucionar a crise habitacional de várias nações e na busca pela redução de impacto ambiental do setor.

Referências

- [1] Buswell, R. A., Soar, R. C., Gibb, A. G., Thorpe, A. *Freeform construction: mega-scale rapid manufacturing for construction*, Automation in construction, 16(2) (2007) 224-231.
- [2] Oner, A. D. N. A. N., Akyuz, S., Yildiz, R. *An experimental study on strength development of concrete containing fly ash and optimum usage of fly ash in concrete*, Cement and Concrete Research, 35(6) (2005) 1165-1171.
- [3] Sobolev, K. *The development of a new method for the proportioning of high-performance concrete mixtures*, Cement and Concrete Composites, 26(7) (2004) 901-907.
- [4] García-Alvarado, R., Moroni-Orellana, G., Banda-Pérez, P. *Architectural evaluation of 3D-printed buildings*, Buildings, 11(6) (2021) 254.
- [5] Montjoy, Valeria. *Por moradias sustentáveis e acessíveis: a impressão 3D é o futuro ou o presente?*, 19 Jun 2022. ArchDaily Brasil. (Trad. Souza, Eduardo), <https://www.archdaily.com.br/br/982778/por-moradias-sustentaveis-e-acessiveis-a-impressao-3d-e-o-futuro-ou-o-presente>. ISSN 0719-8906, em 12/09/2022.
- [6] Mohan, M. K., Rahul, A. V., De Schutter, G., Van Tittelboom, K. *Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review*. Cement and Concrete Composites, 115 (2021) 103855.
- [7] Gosselin, C., Duballet, R., Roux, P., Gaudillière, N., Dirrenberger, J., Morel, P. *Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete—a new processing route for architects and builders*, Materials & Design, 100 (2016) 102-109.
- [8] Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G., Thorpe, T. *Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete*, Materials and structures, 45(8) (2012) 1221-1232.
- [9] Mo, Y., Xing, J., Yue, S., Zhang, Y., Zhou, Q., Liu, X. *Dynamic properties of 3D printed cement mortar based on Split Hopkinson Pressure Bar testing*, Cement and Concrete Composites, (2022) 104520.
- [10] De Schutter, G., Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Habert, G., Agusti-Juan, I. *Vision of 3D printing with concrete—Technical, economic and environmental potentials*. Cement and Concrete Research, 112 (2018) 25-36.
- [11] Liu, Z., Li, M., Weng, Y., Qian, Y., Wong, T. N., Tan, M. J. *Modelling and parameter optimization for filament deformation in 3D cementitious material printing using support vector machine*, Composites Part B: Engineering, 193 (2020) 108018.
- [12] Tay, Y. W. D., Ting, G. H. A., Qian, Y., Panda, B., He, L., Tan, M. J. *Time gap effect on bond strength of 3D-printed concrete*, Virtual and Physical Prototyping, 14(1) (2019) 104-113.
- [13] Panda, B., Paul, S. C., Tan, M. J. *Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material*, Materials Letters, 209 (2017) 146-149.
- [14] Suntharalingam, T., Nagaratnam, B., Poologanathan, K., Hackney, P., Ramli, J. *Effect of polypropylene fibres on the mechanical properties of extrudable cementitious material*. In RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication, Springer, Cham (2020) 516-526.

- [15] Nerella, V. N., Hempel, S., Mechtcherine, V. *Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing*, Construction and Building Materials, 205, (2019) 586-601.
- [16] Mechtcherine, V., van Tittelboom, K., Kazemian, A., Kreiger, E., Nematollahi, B., Nerella, V. N., ... Bos, F. *A roadmap for quality control of hardening and hardened printed concrete*, Cement and Concrete Research, 157 (2022) 106800.
- [17] Pessoa, S., Guimarães, A. S., Lucas, S. S., Simões, N. *3D printing in the construction industry- A systematic review of the thermal performance in buildings*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 141 (2021) 110794.
- [18] Tobi, A. L. M., Omar, S. A., Yehia, Z., Al-Ojaili, S., Hashim, A., Orhan, O. *Cost viability of 3D printed house in UK*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 319, (2018) 012061.
- [19] *The cost of 3D printed houses in 2021 | 3DRIFIC*. (n.d.). <https://3drific.com/the-cost-of-3d-printed-houses-in-2021/>
- [20] Apis-Cor. (n.d.). Apis-Cor. <https://apis-cor.thinkific.com/>, em 26/05/2022.
- [21] COBOD. (n.d.). *COBOD - Modular 3D Construction Printers - 3D Printed Buildings*. COBOD, <https://cobod.com/>
- [22] Vulcan | ICON. (n.d.). www.iconbuild.com, <http://iconbuild.com/vulcan>, em 27/09/2022.
- [23] Autodesk. [eBook] *Robotics in Construction*, (2019). <https://bim360resources.autodesk.com/ebooks/robotics-in-construction-pdf>
- [24] Bastian, H. P. *Automação na construção civil: o avanço das impressoras 3D*, Doctoral dissertation, (2021).
- [25] Weisler, D. (2018). *The three things global leaders need to do to prepare for the next big economic shift*. Quartz website, <https://qz.com/1188144/hp-ceo-hpq-davos-how-governments-can-get-workers-ready-for-the-fourth-industrial-revolution/>, 22/09/2022.
- [26] Ferreira, J. O. R. T. *Integração de Metodologia BIM com Ferramentas de Impressão 3D*, Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, Ed, (2019).
- [27] EN 15978, BS EN 15978:2011. *Sustainability of Construction Works – Assessment of Environmental Performance of Buildings – Calculation Method Int. Stand.* (2011).

Isolamento Térmico pelo Interior de Piscinas – Ensaios Laboratoriais

MATIAS Gina^{1,a}, OLIVEIRA Miguel José^{2,b*}, FARINHA Fátima^{2,c}, SILVA Luís^{3,d}, SEGURA Maria^{2,e} e CARMO Francisco^{4,f}

¹Universidade de Coimbra, CERIS / Itecons, Rua Pedro Hispano, s/n, 3030-289 Coimbra, Portugal

² Universidade do Algarve, Campus da Penha, 8005-139 Faro, Portugal

³ Weber Saint-Gobain Portugal, Zona Industrial da Taboeira - Esgueira, 3800-055 Aveiro, Portugal

⁴ Cristal Construções - Materiais e Obras de Construção Civil, Apartado 91, 8501-903 Mexilhoeira Grande - Portimão, Portugal

^aginamatias@itecons.uc.pt, ^bmjolivei@ualg.pt, ^cmfarinha@ualg.pt, ^dluis.silva@saint-gobain.com, ^ea70887@ualg.pt, ^ffranciscocarmo@cristalpools.com

Palavras-chave: Piscinas aquecidas, Isolamento térmico, Sistema inovador, Eficiência energética.

Resumo. As piscinas exteriores aquecidas envolvem consumos de energia elevados, pelo que, encontrar soluções que permitam minimizar as perdas de energia através da envolvente e, em particular, pelo tanque, contribuirá de forma decisiva para a sustentabilidade destes elementos. Neste artigo são apresentados os resultados laboratoriais efetuados na conceção de um sistema inovador de isolamento térmico pelo interior do tanque da piscina, com elevada durabilidade e manutenção reduzida, que permita diminuir as perdas de energia e, conseqüentemente, as necessidades de aquecimento da água. O sistema em estudo explorará um conceito semelhante ao ETICS - External Thermal Insulation Composite Systems, frequentemente aplicado no revestimento exterior de paredes de edifícios com o propósito da melhoria do desempenho térmico dos edifícios, mas com reservas do ponto de vista do impacto a nível de estabilidade mecânica e, por inerência, da capacidade de impermeabilização. Apresentam-se resultados preliminares de estudos laboratoriais referentes a sistemas que incorporam placas de isolamento de diferentes tipos. Da campanha de ensaios realizados, que incluem metodologias experimentais especialmente adaptadas ao sistema em causa, verificou-se que as soluções analisadas apresentam resultados promissores no que respeita à capacidade de impermeabilização à água sob pressão e também no que se refere à suscetibilidade à fissuração.

Introdução

De um modo geral, as piscinas, e em particular as piscinas exteriores aquecidas, envolvem uma utilização significativa de recursos, sobretudo na fase de utilização. Desde o consumo de água às necessidades energéticas para aquecimento e manutenção dos sistemas com salubridade e segurança, interessa, desde logo minimizar gastos e desperdícios associados a estes equipamentos. A manutenção da temperatura da água em níveis de conforto aceitáveis para o utilizador ao longo de todo o ano será um dos principais requisitos das piscinas aquecidas, e, por isso, interessa desenvolver soluções que permitam assegurar a estabilidade desta temperatura, minimizando perdas de calor.

As perdas de energia em piscinas exteriores ocorrem sobretudo por evaporação, radiação e convecção, sendo que o plano de água é a zona onde ocorrem as maiores trocas de calor. No entanto, as perdas por condução através das paredes e pavimento podem ter alguma expressão, podendo representar valores de 2kWh a 7kWh no caso de uma piscina exterior com cerca de 1500 m² [1]. Existem diversas soluções desenvolvidas para minimizar estas perdas, contudo, apresentam algumas limitações, sobretudo no que respeita à sua adaptação a piscinas existentes [2, 3, 4].

No trabalho apresentado, que constitui uma parte da investigação em curso do projeto ECOPOOL +++ - Piscinas aquecidas inovadoras com redução de perdas térmicas e integração de

sistemas de gestão energética e hídrica SMART, analisa-se a possibilidade de utilização de sistemas de isolamento pelo interior das piscinas aquecidas, baseados nos sistemas ETICS (External Thermal Insulation Composite Systems).

Para além das vantagens térmicas, os sistemas ETICS, apresentam também vantagens económicas. Contudo, quando utilizados no interior das piscinas, podem revelar algumas fragilidades, no que respeita, essencialmente, à capacidade de impermeabilização, e também no que respeita à resistência mecânica.

O efeito da presença de água no interior destes sistemas, foi analisado por diversos autores. Esteves et al. [6] analisaram o grau de proteção hidrofóbica conferido por dispersões com silicone, dióxido de titânio e siloxanos em revestimentos de ETICS e verificaram que estas soluções reduzem significativamente a absorção por capilaridade e sob baixa pressão e aumentavam a repelência à água.

Norvaisiene et al. [7] estudaram as alterações relativas às propriedades de absorção de água de ETICS ao longo do tempo, e verificaram que há um declínio da absorção de água em amostras com rede dupla, e que ocorre um ligeiro aumento da absorção de água após ciclos de envelhecimento. Registaram também um aumento do tempo de secagem, sobretudo nas amostras com rede dupla.

Parracha et al. [8] analisaram o desempenho, ao longo do tempo, de diversos tipos de ETICS, expostos a ambiente marítimo. Verificaram, no caso dos sistemas com acabamento à base de cal, que, para além do desenvolvimento acentuado de algas e fungos nas superfícies, houve também um aumento da absorção de água por capilaridade e da permeabilidade ao vapor. Contudo, no caso dos sistemas com base acrílica, foi observada uma diminuição da absorção por capilaridade ao longo do tempo, apesar do aumento da microfissuração. Também foi observada a inexistência de fungos após dois anos de envelhecimento no caso dos sistemas com produtos siliciosos, que sofreram um aumento da absorção de água por capilaridade, e diminuição da permeabilidade ao vapor.

Liisma et al. [9] analisaram as variações dimensionais induzidas por condições diversas de humidade e temperatura em diversos tipos de sistemas ETICS, e verificaram que as amostras sujeitas a 100% de humidade relativa, a uma temperatura constante de 20°C durante 30 dias sofreram variações dimensionais pouco significativas. Adicionalmente, de um modo geral, verificaram que os sistemas com argamassa de base mineral serão mais suscetíveis a variações de temperatura e humidade.

Do ponto de vista da exposição à humidade, os estudos apresentados demonstram que a seleção dos revestimentos finais dos sistemas ETICS têm uma influência significativa no desempenho do conjunto. Acabamentos de base mineral ou cal apresentam uma menor durabilidade do que acabamentos acrílicos, com siloxanos ou outro tipo de hidrofugante. Estes afetam, não só, a capacidade de absorção dos sistemas, mas também a capacidade de secagem e a permeabilidade ao vapor de água. Consequentemente, a absorção de água elevada poderá potenciar o desenvolvimento de algas e fungos. A estrutura interna do revestimento, com a presença de uma ou duas redes de reforço, poderá também desempenhar um papel importante no comportamento à água do conjunto.

No que respeita às resistências mecânicas, Norvaišienė et al. [10], fizeram variar alguns dos elementos que constituem um sistema de ETICS e analisaram a sua resistência ao impacto, através de uma metodologia inovadora. Os autores estabeleceram uma relação entre o ângulo de fissuração e a elasticidade do revestimento dos sistemas analisados, sendo que, como esperado, uma maior elasticidade da superfície traduz-se numa menor fendilhação da superfície quando sujeita a uma carga pontual.

Francke and Zamorowska [11] analisaram a resistência ao granizo de sistemas de ETICS com diversos tipos de rede e argamassa de reforço. Através de um método de ensaio inovador, os autores avaliaram os danos superficiais e a resistência a fraturas provocados por uma esfera de poliamida com uma massa e diâmetro standard. A metodologia implementada permitiu analisar com maior detalhe a resistência aos danos provocados pelo impacto de um corpo duro, quando comparada com o método descrito pela ETAG 004. O trabalho desenvolvido permitiu também verificar que a utilização de colas em dispersão em vez de colas de base cimentícia teve como resultado uma maior

resistência ao impacto do conjunto. Por outro lado, não foram registadas diferenças significativas em amostras com redes de reforço com gramagens distintas.

Malanho e Veiga [12] analisaram a influência das propriedades das argamassas e do isolamento térmico que constitui os sistemas de ETICS na resistência entre as camadas. Estudaram a resistência adesiva entre as várias camadas de 15 sistemas distintos e verificaram que a resistência adesiva entre a argamassa e o isolamento térmico é influenciada, sobretudo, pela resistência à tração do isolamento, e que a resistência adesiva entre a argamassa e o suporte de betão depende, sobretudo, da resistência à tração da argamassa. Por outro lado, verificou-se que a resistência à flexão da argamassa de colagem dá indicações acerca da resistência adesiva deste componente ao substrato.

Perante as diferentes análises das resistências mecânicas de sistemas de ETICS, considera-se que a análise do comportamento destes sistemas se reveste de alguma importância, sobretudo no que respeita à ação de cargas pontuais, e à interação entre as diferentes camadas do sistema. Uma vez mais, a adequada seleção dos elementos que constituem as diferentes camadas terá um papel fundamental na durabilidade e na suscetibilidade à fissuração da superfície do revestimento.

No âmbito do estudo da aplicação de sistemas semelhantes a ETICS no revestimento interior de piscinas, foram desenvolvidos ensaios laboratoriais que permitiram aferir o impacto das ações externas que estes sistemas possam vir a sofrer, e que se consideram críticas. Foi analisado o desempenho de duas soluções distintas no que respeita ao contacto permanente com água da última camada do sistema, ou imediatamente abaixo do revestimento final, e a resistência a cargas pontuais. Tendo em conta os estudos desenvolvidos no que respeita ao comportamento à água dos sistemas ETICS, verifica-se que, no que respeita à aplicação em piscinas de sistemas semelhantes, a seleção da última camada deve ser bastante criteriosa. Considera-se, contudo, que, uma vez que a última camada do sistema corresponderá, neste caso, a revestimento cerâmico ou semelhante, que à partida assegurará a impermeabilização do conjunto, a capacidade de impermeabilização do sistema será uma propriedade menos sensível do que a resistência a cargas pontuais.

A descrição das metodologias implementadas, resultados e conclusões dos ensaios realizados são apresentados nos pontos seguintes.

Metodologia

Foram seleccionadas duas soluções de revestimento com base em componentes de ETICS já existentes no mercado, ambas constituídas pela mesma argamassa de colagem, pela mesma camada de reforço (argamassa + rede) e membrana de impermeabilização com rede embebida. Foi utilizado isolamento térmico com 50 mm de espessura: numa das soluções considerou-se EPS (poliestireno expandido) e noutra XPS (poliestireno extrudido).

Para aferir a capacidade de impermeabilização do conjunto, considerou-se a metodologia descrita no ponto A.7 da norma de ensaio EN 14891 [13], relativa a produtos de impermeabilização para aplicação na base de colagem de ladrilhos cerâmicos. Foram preparados provetes em suportes de betão com 150 mm x 150 mm. Os suportes de betão foram preparados de acordo com os requisitos da norma e permaneceram em cura por um período mínimo de 28 dias. Uma vez decorrido o período de cura, foram aplicadas as diferentes camadas dos sistemas de revestimento, para os dois tipos de isolamento seleccionados. Foram preparados 6 provetes por amostra, sendo que 3 foram aplicados com uma placa de 150 mm x 150 mm de isolamento térmico contínua, e outros 3 provetes foram preparados com 2 placas contíguas de 75 mm x 150 mm, de modo a simular o desempenho dos materiais nas juntas das placas de isolamento térmico. Na Figura 1 exemplifica-se os dois tipos de provetes preparados com XPS, antes da aplicação das camadas posteriores ao isolamento térmico. Após aplicação e cura de todas as camadas, as faces laterais e a base dos provetes foram revestidas com uma borracha líquida impermeabilizante, conforme exemplificado na Figura 2. O ensaio foi realizado com os provetes com a superfície dos provetes voltada para baixo, na estrutura de ensaio apresentada na Figura 3. Os provetes foram mantidos com a face do revestimento exposta a água a uma pressão constante de 150 kPa, numa zona confinada de 100 mm de diâmetro, durante 7 dias. A determinação da massa seca dos provetes realizada antes do início do

ensaio e da massa dos provetes no final dos 7 dias permitiu aferir a quantidade de água absorvida por cada um dos provetes.

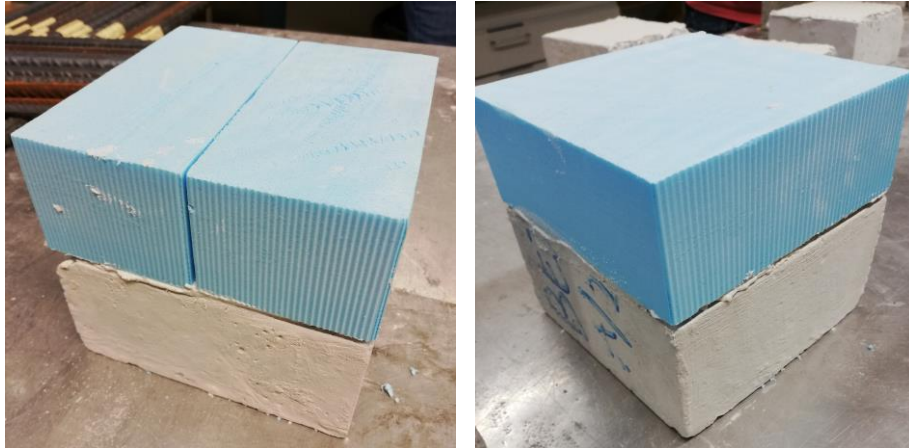


Figura 1. Provetes de XPS para ensaio de determinação da capacidade de impermeabilização.



Figura 2: Provetes para ensaio de determinação da capacidade de impermeabilização após revestimento da base e das faces laterais.



Figura 3: Estrutura do equipamento utilizado para ensaio de determinação da capacidade de impermeabilização.

A resistência mecânica foi aferida tendo como base o procedimento de ensaio descrito pela norma EN 12430 [14], relativo à avaliação do comportamento de isolamento térmico quanto exposto a cargas pontuais. Para o efeito, foram preparados dois tipos de provetes: um constituído pela placa de isolamento térmico revestida com a argamassa de reforço com rede, e outro constituído pela placa de isolamento térmico revestida com a argamassa de reforço com rede e a membrana de impermeabilização também com rede embebida. Para este ensaio foi apenas caracterizada a solução com XPS como isolamento térmico.

Foi utilizado um indentador de aço com superfície plana, cilíndrico, com um diâmetro de, aproximadamente, 80 mm de diâmetro, conforme exemplificado na Figura 4. O indentador foi encostado à zona a ensaiar, e foi aplicada uma carga constante, a uma taxa de 5 mm/min, até ser atingida uma deformação de 2%, 5% e 10% no caso do sistema completo, e 1%, 1,5%, 2% e 10%. As alterações da superfície foram inspecionadas visualmente, e foram observadas, microscopicamente, as fissuras formadas em cada uma das etapas de deformação.

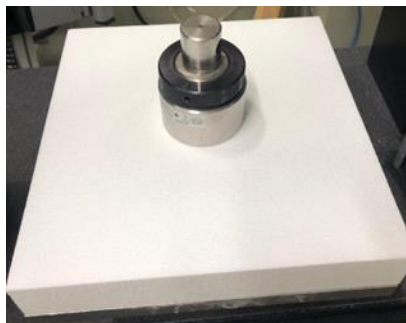


Figura 4: Ensaio de determinação da resistência a cargas pontuais.

Resultados e análise da campanha experimental

Capacidade de impermeabilização. Os resultados obtidos para as duas soluções com isolamento térmico distinto são apresentados na Tabela 1. Foi determinada a variação de massa, em percentagem, para cada uma das soluções, tendo em conta que metade dos provetes foi produzida com o isolamento térmico em contínuo e outra metade com uma junta na zona central do provete.

Tabela 1: Resultados do ensaio de capacidade de impermeabilização

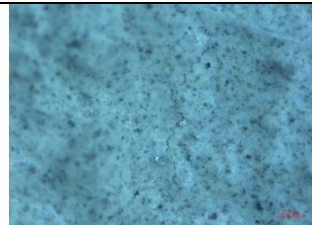
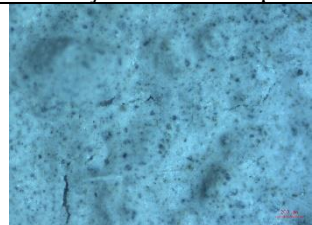
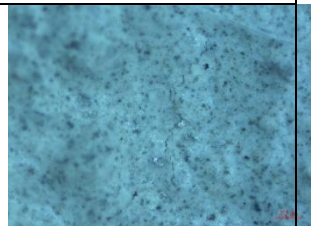
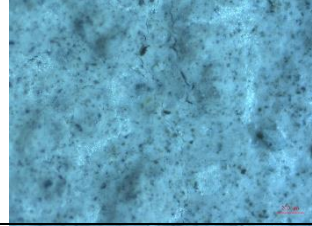
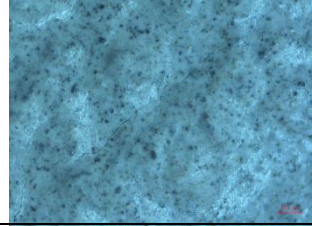

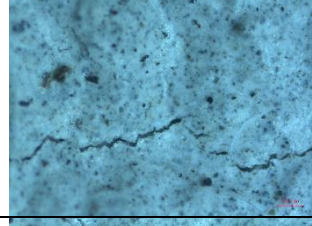
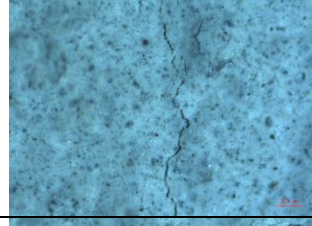
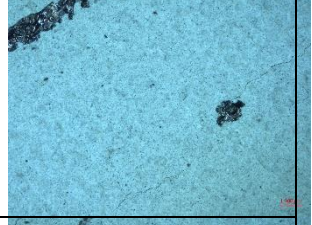
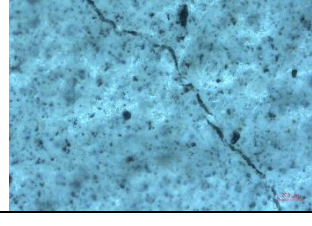
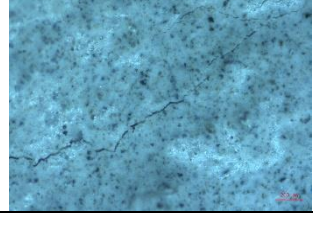

Isolamento térmico		Massa inicial (g)	Massa final (g)	Variação massa (%)		
XPS	Contínuo	3861,7	3866,6	0,13	0,11	0,1
		3812,5	3816,5	0,10		
		3788,1	3792,0	0,10		
	Com junta	4044,1	4048,6	0,11	0,11	
		3804,0	3808,2	0,11		
		3823,7	3827,6	0,10		
EPS	Contínuo	3780,1	3788,8	0,23	0,22	0,2
		3632,6	3644,0	0,31		
		4010,8	4015,1	0,11		
	Com junta	3532,0	3535,8	0,11	0,15	
		4061,8	4071,4	0,24		
		3755,7	3760,1	0,12		

Verificou-se que a absorção de água das duas soluções de revestimento analisadas varia entre 0,1 % e 0,2 %. No caso da amostra com EPS na sua constituição, verificou-se que os provetes com revestimento contínuo apresentam valores ligeiramente superiores, contudo, as diferenças registadas não são significativas. De um modo geral, verifica-se que as duas amostras, com ou sem revestimento contínuo, apresentam variações de massa muito baixas, e, como tal, absorções de água praticamente insignificantes. Considera-se, por isso, que a capacidade de impermeabilização da membrana utilizada é bastante elevada, uma vez que impediu a passagem de água sob pressão para o interior do provete.

Resistência a cargas pontuais. Os resultados obtidos no ensaio de determinação da resistência a cargas pontuais são apresentados na Tabela 2 e na Tabela 3. Na Tabela 2 apresenta-se os resultados correspondentes à amostra de XPS apenas com a camada de reforço (argamassa + rede aplicada sobre o isolamento térmico). Na Tabela 3 são apresentados os resultados da amostra com XPS com camada de reforço (argamassa + rede) e camada impermeabilizante (membrana com rede embebida). As tabelas dos resultados deste ensaio incluem a carga obtida para cada percentagem de deformação e os registos fotográficos das observações ao microscópio. Todas as figuras

representadas nas tabelas têm a mesma escala de ampliação (unidade = 200 μm). Na Figura 5 são apresentados os dois provetes ensaiados.

Tabela 2: Resultados do ensaio de resistência a cargas pontuais da amostra apenas com argamassa de reforço

Deformação	Carga (N)	Observação ao microscópio		
1,0 %	1964			
1,5 %	2801			
2,0 %	3477			
10 %	5356			

Com o ensaio de resistência a cargas pontuais do sistema de XPS com duas soluções distintas de revestimento foi possível observar que a camada correspondente à membrana de impermeabilização (Figura 5, direita), confere resistência ao conjunto. Ainda que as deformações observadas neste provete sejam permanentes no caso dos pontos com deformação de 5 % e 10 %, a ocorrência de fissuração observável ao microscópio é bastante menos significativa do que no caso da amostra que tem apenas a aplicação da argamassa de reforço com rede. Com 2% de deformação, a amostra com membrana de impermeabilização não apresenta fissuras visíveis ao microscópio, ao contrário do que acontece com a amostra apenas com argamassa de reforço. A amostra com argamassa de reforço, para além da deformação permanente sofrida com 10 % de deformação, apresenta bastante fissuração nos limites da zona de contacto do indentador.

Os resultados obtidos poderão estar relacionados com o facto de uma das amostras ter apenas uma rede de reforço, e a outra ter uma segunda rede embebida na membrana de impermeabilização. Por outro lado, a natureza da membrana de impermeabilização, que apresenta uma rigidez inferior à argamassa de reforço, e uma maior elasticidade, propicia também uma menor fendilhação da camada superficial.

Após desconstrução de provetes com membrana de impermeabilização sujeitos a este ensaio, verificou-se que a camada da argamassa de reforço localizada imediatamente abaixo se encontrava fissurada, ainda que a membrana não apresentasse indícios de fratura.

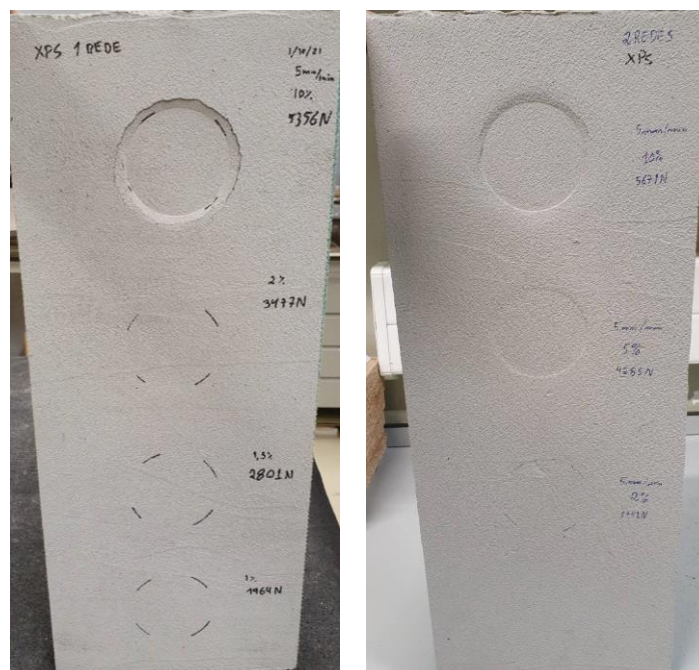
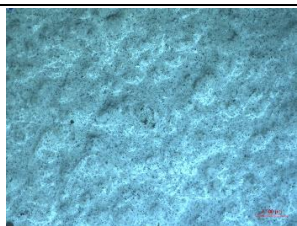
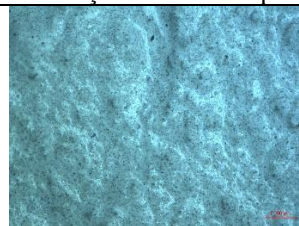
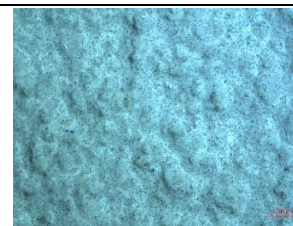
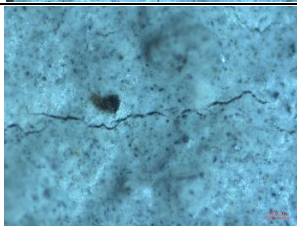
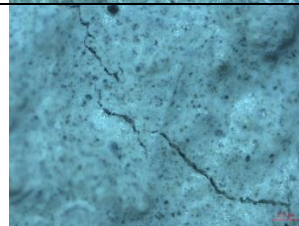
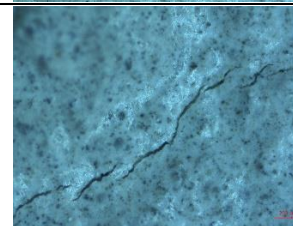
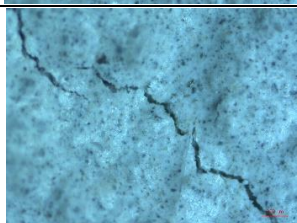
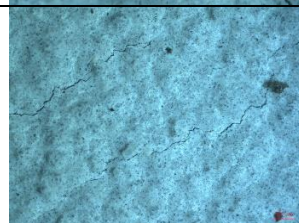
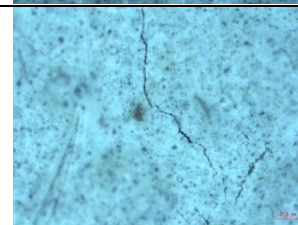


Figura 5: Ensaio de determinação da resistência a cargas pontuais: provete com argamassa de reforço (esquerda) e provete com argamassa de reforço e membrana de impermeabilização (direita)

Tabela 3: Resultados do ensaio de resistência a cargas pontuais da amostra com argamassa de reforço e membrana de impermeabilização

Deformação	Carga (N)	Observação ao microscópio		
2,0 %	1741			
5,0 %	4285			
10,0 %	5671			

Os resultados deste ensaio evidenciam a importância da existência da membrana de impermeabilização no que respeita à ocorrência de cargas pontuais que possam danificar o sistema de revestimento e que terá ainda maior relevância comparativamente a um sistema rígido (suporte em betão) para prevenção de infiltrações; por outro lado, considerando a fissuração da camada de base, questiona-se até onde a mesma não deva apresentar propriedades mecânicas mais próximas da própria argamassa de impermeabilização.

Conclusões

No âmbito do projeto ECOPOOL+++ foi analisado o desempenho de sistemas de revestimento destinados à aplicação no interior de piscinas, baseados nos sistemas ETICS, e com o intuito de minimizar perdas pela envolvente da piscina.

Foram analisadas duas soluções constituídas por produtos existentes no mercado e foi avaliada, por um lado, a capacidade de impermeabilização dos sistemas, e, por outro lado, a resistência a cargas pontuais, parâmetros que se consideram críticos para a utilização pretendida.

No que respeita à capacidade de impermeabilização, foram analisadas duas soluções semelhantes, nas quais se fez variar o tipo de isolamento térmico, sendo a camada superficial uma membrana de impermeabilização com rede embebida. Para este ensaio, verificou-se que, em ambas as soluções, a absorção de água sob pressão foi praticamente nula, pelo que estas poderão ser soluções eficazes para o revestimento interior de piscinas.

Relativamente à resistência a cargas pontuais, verificou-se que o revestimento final tem uma importância significativa no desempenho do conjunto, sendo que a presença da membrana de impermeabilização, com rede de reforço embebida, reduz significativamente a suscetibilidade à fendilhação.

Agradecimentos

O projeto ECOPOOL+++ (ALG-01-0247-FEDER-047231 / CENTRO-01-0247-FEDER-047231) é cofinanciado pelo Programa Operacional Regional do Centro e pelo Programa Operacional Regional do Algarve através do FEDER, em co-promoção entre Cristal Construções, Materiais e Obras de Construção Civil Lda; Itecons - Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico para a Construção, Energia, Ambiente e Sustentabilidade; Itelmatis – Lda. e Universidade do Algarve. Os autores agradecem o apoio financeiro concedido para este trabalho e a partilha de conhecimentos e cooperação de todos os parceiros.

Referências

- [1] M. Bernhard, O. Marc, E. Quilichini, J. Castaing-Lasvignottes, *Sensitivity analysis of an outdoor swimming pool under dynamic conditions*, Procedia Manuf, 35 (2019) 124-129. doi: 10.1016/j.promfg.2019.05.014.
- [2] PolyfoamXPS UK, <https://polyfoamxps.co.uk/application-fields/floors/swimming-pool-basins/>
- [3] HeatForm UK, <https://www.heatform.co.uk/>
- [4] Styropool DE, <https://www.duw-pool.de/en/products/pools/styropool/>
- [5] V. Sulakatko, I. Lill, *The economic relevance of on-site construction activities with External Thermal Insulation Composite System (ETICS)*, Int J Strateg Prop Manag, 23:4 (2019) 213–226. doi: 10.3846/ijspm.2019.7071.
- [6] C. Esteves, H. Ahmed, I. Flores-Colen et al., *The influence of hydrophobic protection on building exterior claddings*, J Coat Technol Res, 16 (2019) 1379–1388. <https://doi.org/10.1007/s11998-019-00220-7>.
- [7] R. Norvaisiené, G. Gričiutė, R. Bliudzius, J. Ramanauskas, *The Changes of Moisture Absorption Properties during the Service Life of External Thermal Insulation Composite System*, Materials Science (Medziagotyra), 19, No. 1. (2013), ISSN 1392-1320. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.ms.19.1.3834>.
- [8] J.L. Parracha, G. Borsoi, R. Veiga, I. Flores-Colen, L. Nunes, C.A. Viegas, L.M. Moreira, A. Dionísio, M. Glória Gomes, P. Faria, *Durability assessment of external thermal insulation*

composite systems in urban and maritime environments, Science of The Total Environment, 849 (2022) 157828, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157828>.

- [9] E. Liisma, G. Lõhmus, L-M. Raado, *The effect of temperature and humidity on the permanence of external thermal insulation composite systems*, Procedia Engineering, 108 (2015) 340 – 348, doi: 10.1016/j.proeng.2015.06.156.
- [10] R. Norvaišienė, V. Buhagiar, A. Burlingis, K. Miškinis, *Investigation of mechanical resistance of external thermal insulation composite systems (ETICS)*, Journal of Building Engineering, 32 (2020) 101682, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101682>.
- [11] B. Francke, R. Zamorowska, *Resistance of External Thermal Insulation Composite Systems with Rendering (ETICS) to Hail*, Materials, 13 (2020) 2452. <https://doi.org/10.3390/ma13112452>.
- [12] S. Malanho, M.R. Veiga, *Bond strength between layers of ETICS – Influence of the characteristics of mortars and insulation materials*, Journal of Building Engineering, 28 (2020) 101021, ISSN 2352-7102, <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101021>.
- [13] CEN, EN 14891:2012 - Liquid-applied water impermeable products for use beneath ceramic tiling bonded with adhesives - Requirements, test methods, evaluation of conformity, classification and designation. Brussels (2012).
- [14] CEN, EN 12430:2013 - Thermal insulating products for building applications - Determination of behaviour under point load. Brussels (2013).

Telha de Concreto: Adição de fibra derivada de bagaço de cana-de-açúcar

VILPERT Gabriela Coral^{1, a}, VILPERT Maristela Coral^{2, b}, VILPERT Gustavo Coral^{3, c}, SAVI Aline Eyng^{4, d} e ANTUNES Elaine Guglielmi Pavei^{5, e}

¹R. Tadeu Cizeski Júnior, Bortolatto, Morro da Fumaça/SC, 88830-000, Brazil

²R. Tadeu Cizeski Júnior, Bortolatto, Morro da Fumaça/SC, 88830-000, Brazil

³R. Tadeu Cizeski Júnior, Bortolatto, Morro da Fumaça/SC, 88830-000, Brazil

⁴ Av. Universitária, Bairro Universitário, Criciúma/SC, 88806-000, Brazil

⁵ Av. Universitária, Bairro Universitário, Criciúma/SC, 88806-000, Brazil

^agabriela_coral@hotmail.com, ^bcoralvilpert@brturbo.com.br, ^cgustavovilpert@hotmail.com, ^darquiteta.alinesavi@gmail.com, ^eelainegpa@unesc.net

Palavras-chave: Artefatos de cimento, Componente cimentício, Sistemas de Cobertura, Fibra Vegetal.

Resumo. O desenvolvimento sustentável está em pauta em diversas áreas da indústria, principalmente na construção civil. Desta forma a procura por materiais alternativos com intuito de aproveitar materiais que são descartados, como por exemplo, o bagaço de cana-de-açúcar está em crescimento. Esta pesquisa tem como objetivo a utilização da fibra derivada do bagaço de cana em telhas de concreto como reforço. Estas fibras foram tratadas com o método de deslignificação alcalina. Inicialmente foram utilizadas com comprimentos diferenciados, de 20, 25 e 30 mm com 2 percentuais de adição em corpos de prova prismáticos, a fim de analisar qual combinação se adaptaria melhor na massa da telha. Após análise, adotou-se o comprimento de 25 mm e o percentual de 800 g/m³ adição. Foram fabricadas 11 telhas com adição das fibras e realizados os ensaios de ruptura à flexão, permeabilidade e estanqueidade do sistema de cobertura. No ensaio de flexão as 6 telhas com adição de fibra apresentaram valores de carga na ruptura menores que os obtidos nas telhas sem adição, porém o valor médio encontrado de 3,70 kN atende as especificações da NBR 13858-2: 2009. No ensaio de permeabilidade, 2 peças apresentaram vazamentos e no ensaio de estanqueidade do sistema de cobertura baseado na NBR 15575-5: 2013 não ocorreu vazamento após uma aspersão de água por 6 h.

Introdução

O desenvolvimento sustentável é definido como um modelo econômico, social, cultural e ambiental que visa satisfazer as necessidades das gerações atuais sem comprometer as necessidades das gerações futuras e é discutido por todas as áreas da indústria, sobretudo pela construção civil, já que é responsável por utilizar entre 14 a 50 % dos recursos extraídos no planeta [1]. Para Izquierdo (2011) [2] existe uma mudança de mentalidade da sociedade ou a necessidade de desenvolver materiais alternativos como caminho para sustentabilidade.

De acordo com Callister (2011) [3], os materiais compósitos são formados pela mistura de dois ou mais materiais, sendo que suas características associadas são melhores que a dos materiais quando avaliados isoladamente. A incorporação de fibras no concreto é utilizada há décadas, com intuito de dificultar a propagação de fissuras o que pode ocasionar aumento de resistência mecânica nos materiais compósitos [4]. Segundo Gram (1983) [5], a investigação sobre as possibilidades do uso de fibras naturais orgânicas como reforço em placas finas de concreto iniciou no final da década de 60. Agopyan (1991) [6] relacionou 19 fibras vegetais potencialmente úteis para a construção civil a partir das propriedades mecânicas, físicas e do tamanho do seu cultivo no Brasil. Cresce o

interesse em substituir as fibras sintéticas pelas de origem vegetal, principalmente às derivadas de vegetais que possuem abundância no país como, por exemplo, a fibra derivada do bagaço de cana-de-açúcar. Segundo dados do Compainha Nacional de Abastecimento (2017) [7] a safra 2017/18 de cana-de-açúcar está estimada em 646,34 milhões de toneladas, e, por conseguinte torna esta fibra muito promissora por sua grande disponibilidade.

O sistema de cobertura tem papel fundamental nas edificações e possui função de assegurar a estanqueidade às águas pluviais, proteger os demais sistemas e contribuir no conforto térmico e acústico da habitação [8]. Estas funções, no entanto, dependem das propriedades dos elementos da cobertura. A partir disso o mercado oferece maior variedade de telhas compostas por diferentes materiais [9]. Segundo a NBR 13858-2: 2009 [10] a telha de concreto é um componente para cobertura com forma essencialmente retangular, perfil geralmente ondulado composto de cimento, agregado, água, aditivos ou adições, fornecido na cor natural ou colorido pela adição de pigmento. Atualmente, a qualidade das telhas que são fabricadas no país e certificadas seguem os padrões internacionais, e em algumas fábricas o processo é bastante rigoroso, tendo o controle de toda matéria-prima e do pós-produção [11].

Dentro desta contextualização, a presente pesquisa propõe a análise da influência da adição de fibra derivada do bagaço de cana-de-açúcar em telhas de concreto. Para tal realizou-se ensaio de permeabilidade e de resistência à flexão de acordo com a NBR 13858-2: 2009 [10] e verificação da estanqueidade do sistema de cobertura baseado na NBR 15575-5: 2013 [8].

Materiais e métodos

A metodologia adotada nesta pesquisa é ilustrada a partir do fluxograma apresentado na (Figura 1).

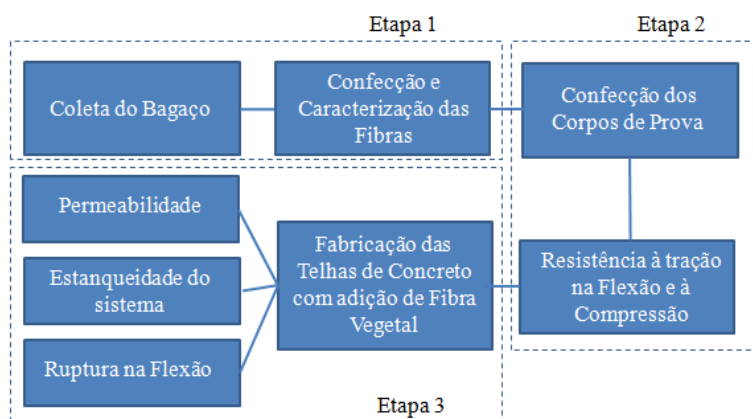


Figura 1: Fluxograma das etapas e subetapas

A primeira etapa desta pesquisa refere-se à obtenção do bagaço de cana-de-açúcar, confecção das fibras vegetais e caracterização física das mesmas. A segunda etapa consiste na definição do comprimento e do teor de fibras a ser adicionada nas telhas de concreto. Para tal, realizou-se um estudo prévio através da produção de alguns traços que variavam entre si o comprimento das fibras e os teores de incorporação, a fim de verificar as diferentes propriedades mecânicas e facilidade da mistura no estado fresco. Para isto foram confeccionados corpos de prova prismáticos com dimensões de 4x4x16 cm, baseados na NBR 13279: 2005 [12], e realização de ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão. Baseado nos melhores resultados de resistência mecânica e facilidade de homogeneização definiu-se a quantidade de adição e o comprimento das fibras para incorporação na produção de telhas. Posteriormente, na terceira etapa, fez-se a inserção das fibras vegetais no processo industrial de fabricação da telha, para, por fim serem analisadas de acordo com a NBR 13858-2: 2009 [10] e verificadas quanto a estanqueidade do sistema de cobertura baseado na NBR 15575-5: 2013 [8].

A cana-de-açúcar é rica em celulose, hemicelulose e lignina. Estes três componentes representam a maior parte da sua massa vegetal, tendo ainda em sua composição proteínas, óleos vegetais e minerais. Esta composição de matérias faz com que ela possa ser utilizada como fibra de reforço

[13]. Entre as vantagens da utilização deste material pode-se citar sua grande disponibilidade e o baixo consumo de energia em sua produção quando comparado a fibras sintéticas. No entanto, o bagaço de cana tem sua durabilidade comprometida por ser de origem vegetal, principalmente quando exploradas em matrizes cimentícias pelo seu caráter alcalino. Outro ponto a ser mencionado, é sua grande absorção de água que pode comprometer sua resistência, porém ambas características podem ser neutralizadas com tratamentos superficiais [2]. Existe uma variedade de tratamentos que separam os constituintes do bagaço. O método a ser utilizado nesta pesquisa é baseado na deslignificação alcalina, baseado em Moubarick, Grimi e Bousseta (2013) [14], e já utilizado por outros autores como Pellegrin (2017) [15], Tita, Paiva e Frollini (2002) [16] e Gurgel (2007) [17]. Este processo tem como objetivo o tratamento das fibras de celulose com solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH), que remove um percentual de lignina, ceras e óleos que cobrem a superfície externa da fibra, assim aumenta-se a rugosidade e proporciona melhor aderência entre os materiais.

O bagaço utilizado na pesquisa tem como origem a região sul de Santa Catarina. O processo de obtenção das fibras vegetais se iniciou pela secagem do material a temperatura ambiente por 10 dias e posterior secagem na estufa com temperatura de 110°C durante 48 horas, na sequência foi cortado manualmente conforme medidas previstas. Após, deu-se início ao processo que tem como função a solubilização da hemicelulose e da lignina. O procedimento está representado na (Figura 2).

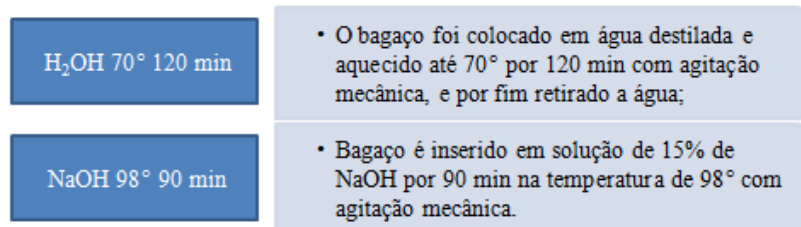


Figura 2: Fluxograma das etapas do processo de obtenção da fibra

Depois de concluído este processo, as fibras obtidas foram lavadas com água em abundância e colocadas imersas em água à temperatura ambiente por 24 horas, e, por fim, mantidas em estufa por 48 horas a 30°C. A (Figura 3) ilustra os processos realizados para obtenção das fibras.



Figura 3: Processos para obtenção da fibra: (a) bagaço seco, (b) bagaço cortado, (c) bagaço antes da inserção em ácido, (d) e fibras vegetais após secas em estufa

Visando observar e analisar as fibras obtidas, foi realizado o ensaio de área superficial específica, conhecido por B.E.T., que foi obtido pela Quantachrome, modelo Nova 1200e. Neste ensaio, a amostra de fibra passou por um processo de desgaseificação com intuito de eliminar possíveis obstruções ou umidade adsorvida na superfície da partícula e posteriormente conduzida à temperatura constante em banho com nitrogênio líquido e submetido à pressão com nitrogênio gasoso. Além do B.E.T., foi realizada a microscopia óptica, utilizando o microscópio Olympus BX41M-LED, com ampliação de 50 vezes.

O possível aumento das propriedades mecânicas dos compósitos com adição de fibras depende do comprimento das mesmas e do seu percentual de adição. Colombo et al. (2017) [18] utilizou fibras de polipropileno e nylon, com adição de 500 a 1300 g/m³, em argamassa de revestimento com comprimentos de 12 e 11 mm, Tiscoski et al. (2017) [19] utilizou fibras de polipropileno em argamassa com 10mm de comprimento e adição de 500 a 1500g/m³, já Pellegrin (2017) [15]

utilizou fibra derivada de bagaço de cana de açúcar com tamanhos de 20 a 30mm em massa de telha de fibrocimento.

Com base nestas pesquisas, definiram-se os percentuais de adição e os comprimentos das fibras a serem inseridas no estudo prévio, de acordo com a (Tabela 1).

Tabela 1: Características das amostras para fabricação dos corpos de prova

Comprimento de fibra (mm)	Teor de incorporação (g/m ³ de concreto)
0	0
20	800
20	1000
25	800
25	1000
30	800
30	1000

O cimento utilizado é o Cimento Portland de alta resistência inicial, o CPV-ARI, que possui alta reatividade devido a sua formulação diferenciada de calcário e argila. Este tipo de cimento é recomendado para indústrias de artefatos de cimento, por auxiliar na rápida desforma e manuseio das peças [20]. Este segue os padrões da NBR 5733: 1991 [21], e possui massa específica de 3,12 g/cm³ conforme especificações do fabricante.

O agregado miúdo empregado possui módulo de finura de 1,8, conforme a NBR NM 248: 2003 [22], sendo classificado como areia fina. Esta possui massa unitária de 1615,70 kg/m³, NBR NM 45: 2009 [23] e massa específica de 2,52 g/cm³, NBR NM 52: 2009 [24].

Na mistura também foi utilizado o aditivo plastificante e impermeabilizante próprio para artefatos de concreto, que garante melhor acabamento, reduz eflorescência e auxilia no desmolde das peças, este segue especificações da NBR 11768: 2011 [25]. A água empregada em todas as etapas da pesquisa foi obtida diretamente da rede de abastecimento de água da concessionária local, de acordo com NBR 15900-1: 2009 [26].

O traço utilizado, para a telha e para os corpos de prova prismáticos, trata-se de um traço comercialmente empregado na fabricação de telhas de concreto do modelo Coppo Venetto por empresa do ramo, localizada na região sul de Santa Catarina, sendo ele 1: 4,93: 0,48 (cimento, areia e água) e ainda uma adição de 0,04% de ativo plastificante e impermeabilizante.

A confecção dos corpos de prova prismáticos com dimensões 4x4x16 cm, foi realizada conforme especifica a NBR 13279: 2005 [12]. Para moldagem destes, houve a necessidade da retirada da massa do misturador a fim de que as fibras fossem adicionadas aos poucos, facilitando assim a homogeneização manual. Após esta mistura, seguiu-se a compactação manual em três camadas.

Com o objetivo de se assemelhar com o tempo de cura adotado pela indústria, após nove dias, todos os corpos de prova foram rompidos. Para a realização do ensaio de tração na flexão, utilizou-se uma prensa hidráulica EMIC DL10000, e para o ensaio de tração à compressão axial a prensa hidráulica EMIC SSH200.

O processo industrial para fabricação de telhas é realizado em três etapas: a mistura dos materiais, a extrusão e a cura das peças em estufa. O equipamento utilizado para a extrusão contínua da telha é o modelo CARPER 20560 que produz até 50 telhas por minuto, com capacidade de 40 kg de massa na caixa de extrusão e pressão de 20 t em cada telha extrusada conforme informações do fabricante.

Como todo o processo visa alcançar alta produtividade, para inserir as fibras no misturador da fábrica teria que ser produzida uma quantidade superior a 100 telhas, por esta razão para viabilidade desta pesquisa, alguns processos foram adaptados. Como a homogeneização das fibras, que após retirada da massa do misturador padrão da fábrica, foi realizada manualmente e apenas na quantidade necessária para a produção de 11 telhas.

Após a pré mistura manual e espalhamento das fibras na massa, o compósito foi inserido na máquina de extrusão manualmente. Nesta etapa o equipamento mistura a massa que é extrusada na forma com desmoldante, e por fim cortada pneumáticamente no tamanho especificado pela norma, estes processos podem ser visualizados na (Figura 4).

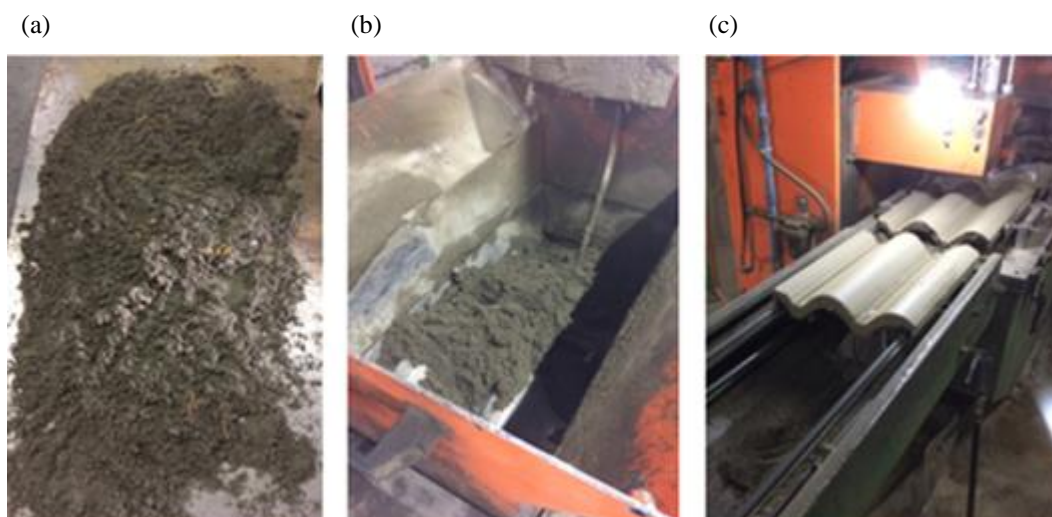


Figura 4: Processos de fabricação das telhas: (a) fibra sendo misturada a massa, (b) massa antes de ser prensada, (c) e telhas ao fim do processo

Após as telhas saírem do equipamento, foram retiradas das formas e colocadas para cura em temperatura ambiente. O teste de permeabilidade realizado nesta pesquisa ocorreu de acordo com as diretrizes da NBR 13858-2: 2009 [10], que utiliza como princípio o exame visual da passagem de água através da telha, a partir da face superior submetida a uma lâmina de água. Este ensaio foi realizado em 6 telhas com adição de fibra vegetal.

Para o requerido ensaio utilizou-se de caixa horizontal impermeável, com dimensões adequadas para comportar a telha e a lâmina de água com vedação das laterais. A lâmina de água foi mantida por 24 horas a temperatura ambiente, com intuito de observar vazamentos e/ou formação de gotas aderentes na face inferior das telhas. O ensaio pode ser visualizado na (Figura 5).

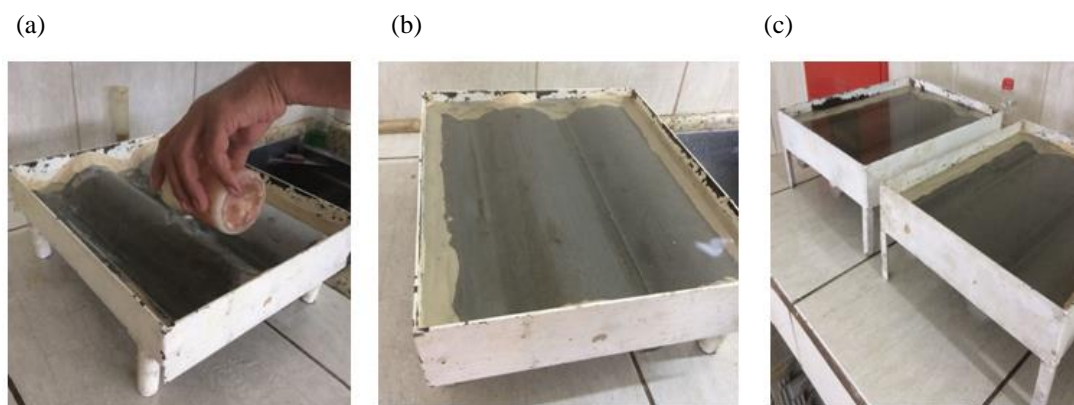


Figura 5: Verificação da permeabilidade: (a) telha posiciona recebendo água, (b) telha com 20 mm de água em sua superfície, (c) telhas após 12 h de ensaio

Após o teste de permeabilidade, as telhas foram submetidas ao ensaio de estanqueidade do sistema. As mesmas foram introduzidas em um protótipo de telhado com a inclinação de 30° ao ar livre para que pudesse sofrer com as ações das intempéries locais, além disto, houve uma aspersão de água em diferentes direções pelo período de 6 horas.

Esse procedimento é baseado no ensaio de estanqueidade da NBR 15575-5: 2013 [8], anexo D, e tem como objetivo observar o aparecimento de vazamentos, escorrimentos ou manchas de umidade na face inferior da cobertura e escorregamento das telhas após a aspersão da água. O protótipo do telhado pode ser visualizado na (Figura 6).

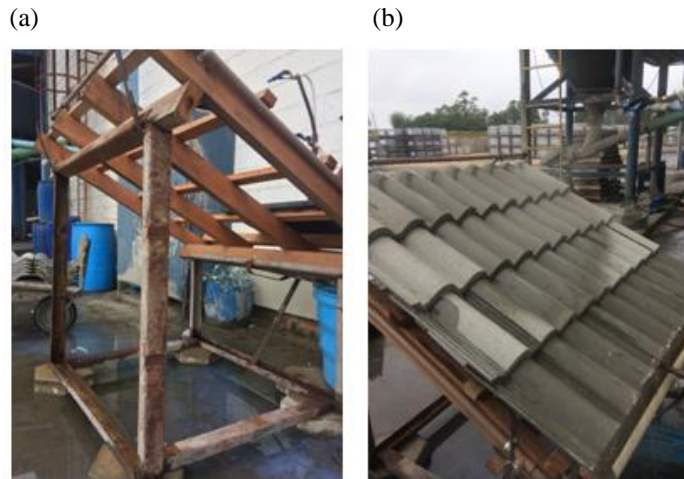


Figura 6: Ensaio de estanqueidade do sistema de cobertura: (a) estrutura semelhante à estrutura de um sistema de cobertura, (b) telhas posicionadas e recebendo água

E, por fim, o ensaio de ruptura à flexão das telhas ocorreu 28 dias após a confecção das peças, conforme as especificações da NBR 13858-2: 2009 [10], utilizando-se 6 telhas para este ensaio. As peças ficaram imersas em água a temperatura ambiente por 24 horas antes do ensaio para simular a pior situação de exposição das peças. Foram ensaiadas também 6 telhas comercializadas pela empresa com o mesmo tempo de cura, a fim de realizar análise comparativa entre os resultados. Para o ensaio as telhas foram bi-apoiadas e receberam a carga através de uma barra de aço articulada posicionada transversalmente na peça. Para determinação da carga de ruptura foi utilizada a prensa hidráulica modelo EMIC PC200 I com aplicação de carga centralizada, progressiva e sem golpes. Para que as telhas estejam de acordo com a norma, não se deve encontrar valores menores que 2400N para carga de ruptura à flexão.

Os resultados dos ensaios das propriedades mecânicas realizados nesta pesquisa passaram por análise estatística de variância (ANOVA), a fim de analisar se estes resultados possuem diferenças significativas com confiabilidade de 95%.

Resultados e discussões

Com o ensaio de área superficial específica – B.E.T. obteve-se o resultado de 0,223 m² por grama de fibra, e através do ensaio de V.T.P. (Porosimetria), observou-se um volume total de poros de 4,17e-4 cc por grama e P/Po de 0,9817. As imagens obtidas pela microscopia óptica podem ser observadas com um aumento de 50 vezes na (Figura 7). As imagens microscópicas das fibras apresentaram multifilamentos de fibras em sua formação, alguns destes apresentam descontinuidade e formação de poros, as imagens obtidas se assemelham as encontradas por Pellegrin (2017) [15] que utilizou o mesmo processo para o tratamento de fibras derivadas do bagaço de cana-de-açúcar. A natureza da fibra e o comprimento irregular dos multifilamentos e o comprimento da fibra irregular, por ter sido cortada manualmente, podem ser fatores que dificultaram a boa distribuição das fibras e a homogeneidade do material dentro do compósito, além de absorção de água pela fibra devido aos poros presentes em sua estrutura, como pode ser visualizado na (Figura 7).

Na moldagem dos corpos de prova houve dificuldade de homogeneização destas fibras e compactação da massa, e pode ter sido resultado da baixa relação de água/cimento utilizada na massa das telhas, já que no processo industrial a compactação ocorre mecanicamente e este baixo índice não influencia diretamente no resultado. Os dados obtidos no ensaio de tração na flexão são demonstrados no gráfico de barras da (Figura 8).

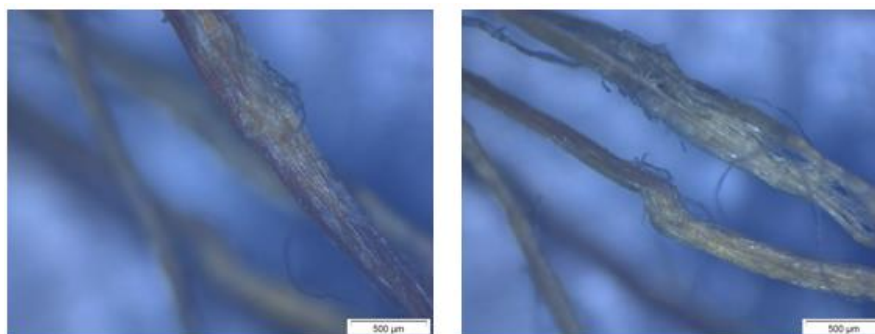


Figura 7: Microscopia óptica da fibra vegetal

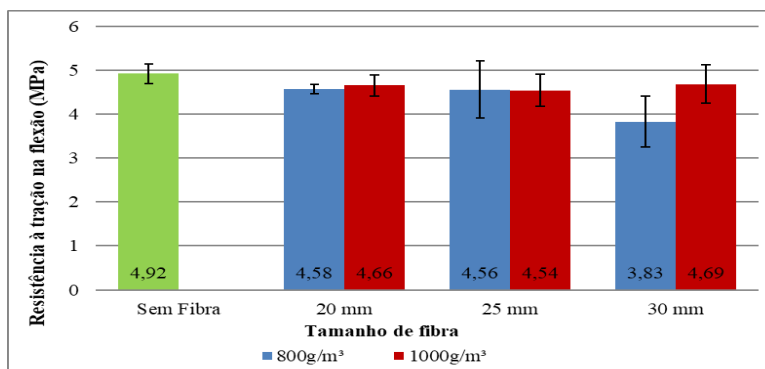


Figura 8: Resultados da resistência à tração na flexão

A partir da realização da ANOVA, pode-se concluir que não há diferença significativa entre as amostras, seja relacionando os percentuais de adição, quanto para o comprimento das fibras. No entanto, percebe-se pelo gráfico, uma redução da média de resistência de tração na flexão nos corpos de prova com adição de fibras em relação ao corpo de prova sem adição, conforme Carvalho et al (2016) [27] este resultado pode estar associado a maior absorção de água e problemas na compactação da massa durante a confecção dos elementos. Em comparação com os resultados obtidos com Pellegrin (2017) [15], Carvalho et al (2016) [27], Izquierdo (2011) [2] que também utilizaram fibras vegetais em elementos cimentícios, os resultados com redução de resistência a flexão foram muito semelhantes. Cabe salientar que nesta pesquisa de acordo com a ANOVA não houve diferença entre as amostras. Além da verificação dos resultados obtidos no ensaio, foi analisado o módulo de ruptura dos corpos de prova. Pode-se observar uma grande diferença entre os corpos de prova com adição de fibras e os corpos de prova sem as fibras. Na amostra sem adição após a ruptura uma trinca com abertura superior a 15 mm pode ser observada, enquanto nas outras amostras se pode visualizar apenas pequenas fissuras após sua ruptura. Ainda em relação aos corpos de prova, após o ensaio tração na flexão foi realizado o ensaio de resistência à compressão, os resultados podem ser observados no gráfico da (Figura 9). Em relação aos comprimentos de fibra e os percentuais de adição, conclui-se através da ANOVA que existe diferença significativa entre as médias, o que indica que as duas variáveis influenciam diretamente no resultado do ensaio. Ainda de acordo com análise estatística, pode-se concluir que em relação à média encontrada para os corpos de prova sem adição de fibras, as duas adições com tamanho de 20 mm não possuem diferença desta, já as adições com outros tamanhos de fibra, possuem diferença significativa da média das amostras sem adição de fibra. Tal diferença pode ser explicada pela dificuldade de compactação da massa. A redução de resistência à compressão acompanhou o comprimento das fibras, comparando com os resultados obtidos de Borges (2017) [28] e Silva (2009) [29], a redução observada nesta pesquisa se assemelha com os resultados encontrados por estes dois autores. A dificuldade encontrada na moldagem, compactação e as características físicas da própria fibra são alguns dos fatores que podem ter auxiliado na redução de resistência à compressão [28].

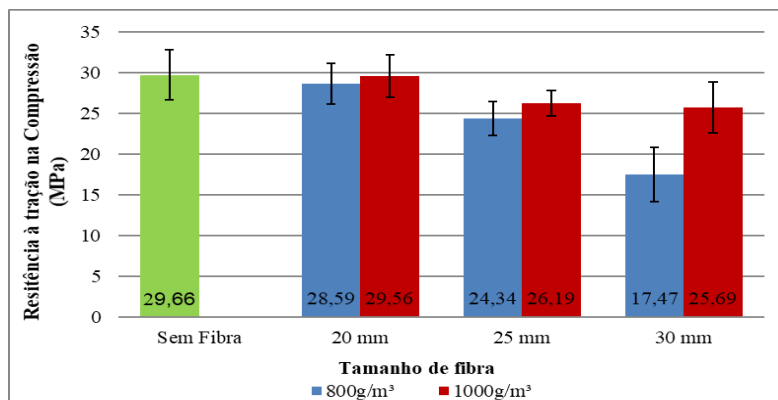
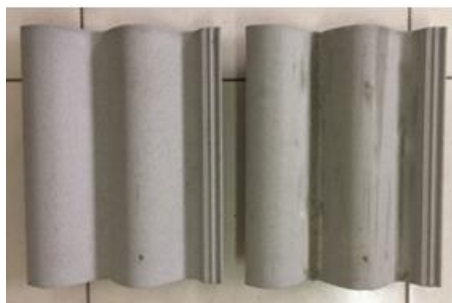


Figura 9: Resultados da resistência à tração na compressão

Com base nos resultados do ensaio de tração por flexão e compressão realizado nos corpos de prova prismáticos, de acordo com a NBR 13279: 2005 [12] e também pela maior facilidade da homogeneização da mistura, adotou-se o tamanho de fibra de 25 mm para fabricação das telhas e o percentual de adição, de 800g/m³ que por ser o menor percentual apresenta maior facilidade de incorporação.

As telhas obtidas nesta pesquisa apresentaram diferenças estéticas das comercializadas na empresa. A diferença de coloração pode ser um item a ser mencionado, sendo que, a comercializada tem uma tonalidade mais clara. Esta diferença pode ser explicada pela homogeneização da massa, como pode ser visualizado na (Figura 10). O acabamento da telha ocorre quando a telha passa pelo processo de extrusão, através do alisamento da superfície da peça. Nesta etapa algumas fibras se prenderam no orifício do equipamento fator que ocasionou linhas de falhas no acabamento conforme pode ser visualizado na (Figura 10).

(a)



(b)



Figura 10: Resultado estético: (a) comparação tonalidade, telha esquerda comum e da direita com inserção de fibras, (b) defeito no perfil acarretado pelas fibras

Para os ensaios de permeabilidade e ruptura a NBR 13858-2: 2009 [10] exige que em todos os testes realizados nas telhas, para a primeira amostragem ser aprovada, de 6 telhas ensaiadas e apenas uma unidade pode apresentar resultados incompatíveis com a norma. No ensaio de permeabilidade, após as 24 h de exposição da peça a lâmina de água, pode-se observar que 2 delas apresentaram vazamentos em sua face inferior após um período de 3 horas. Habitualmente, na empresa as telhas ensaiadas costumam apresentar defeitos em até 15 minutos após este tempo sem apresentar vazamentos e/ou manchas considera-se atendido tal critério. O gotejamento na superfície inferior das telhas aconteceu nos locais onde haviam as falhas derivadas da adição de fibras no processo de fabricação, locais estes, onde houve acúmulo de fibras, e portanto, uma compactação inadequada. De acordo Henriques et al (2014) [30] os acúmulos e a natureza hidrofílica da fibra de celulose facilitam a passagem de água durante a realização do ensaio. Para que se pudesse chegar a um resultado confiável seria necessário a realização do ensaio em outras 6 peças com adição de fibra. No ensaio de estanqueidade do Sistema de Cobertura, após um período de 10 horas (6 horas de aspersão e 4 horas sem aspersão), nenhum gotejamento ou mancha foi observado na superfície inferior dos artefatos de concreto.

Por fim, foram realizados os ensaios de resistência à flexão, de acordo com as especificações na norma regulamentadora de telhas de concreto. Os valores de carga de ruptura estão expressos da (Tabela 2) conforme requisito de apresentação dos resultados da NBR 13858-2: 2009 [10].

Tabela 2: Resultado do ensaio de ruptura à flexão

	Cargas de ruptura obtidas no ensaio (Newton)						Média ± Desvio Padrão (Kn)
	1° telha	2° telha	3° telha	4° telha	5° telha	6° telha	
Referência	3400	4500	4300	4700	3500	3600	4,0 ± 0,56
Com fibra	3600	4100	3600	3400	3900	3600	3,70 ± 0,25

A partir dos valores encontrados verificou-se que em ambas as telhas superaram o valor mínimo exigido pela NBR 13858-2: 2009 [10] para carga de ruptura à flexão de 2400 N. Porém nota-se que a média encontrada nas telhas com fibra é inferior à média do traço de referência mesmo estatisticamente serem consideradas iguais. A redução da carga de ruptura seguiu a tendência observada nos corpos de prova e se assemelha a pesquisa de Savastano (2000) que utilizou diferentes fibras vegetais em telhas de concreto. Henriques (2014) [30] que utilizou fibras vegetais em telhas de fibrocimento e Carvalho et al (2016) [27] que utilizou fibra de sisal em blocos de concreto também chegaram a valores de carga de ruptura à flexão menores que os dos traços de referência. Os resultados apresentados seguem uma tendência de resultado nas propriedades mecânicas do concreto com adição de fibras, principalmente em relação às fibras vegetais que apresentam grandes variações em suas propriedades [28].

Além da análise dos resultados do ensaio de flexão, foi verificado o modo de ruptura das duas telhas que pode ser observado na (Figura 11).

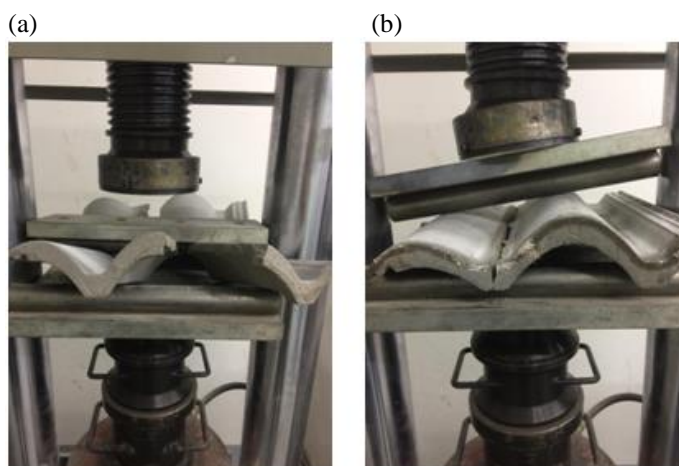


Figura 11: Modo de ruptura das telhas: (a) telha referência, (b) telha com adição de fibras

Pode se notar uma diferença expressiva no modo de ruptura das telhas. Na telha sem adição pode-se perceber a ruptura em vários sentidos da peça enquanto na telha confeccionada com fibras a ruptura nas peças se deu no ponto onde havia a falha derivada do processo de fabricação. Esta mudança no modo de ruptura pode ser explicada pela adição das fibras, uma vez que o material passa a ter um comportamento menos frágil que as peças de referência, isso ocorre pelo fato das fibras servirem como ponte de transferência de tensões, pois ocorre uma redução da velocidade de propagação das fissuras que passa a ter um comportamento pseudodúctil [32].

Conclusões

Por meio de análise comparativa entre os resultados obtidos foi possível verificar que:

- No processo de escolha do tamanho e percentual de adição das fibras através dos ensaios em corpos de prova, pode-se concluir que ambas variáveis impactam na homogeneização e compactação da mistura, porém entre as duas variáveis o tamanho de 25 mm e adição de 800 g/m³ de concreto, foram as que apresentaram melhores resultados para resistência à tração na flexão e compressão e facilidade de mistura na massa;

- As dificuldades encontradas para inserção da fibra nas telhas e os defeitos apresentados pelas mesmas demonstram que o processo produtivo precisaria de alterações para receber a inserção de fibras;

- No teste de permeabilidade, como houve o gotejamento na parte inferior de 2 peças não se pode concluir sua impermeabilização, somente se pode obter resultados confiáveis com a análise de uma segunda amostragem de mais 6 peças com adição de fibra vegetal;

- Os resultados encontrados no ensaio de estanqueidade do sistema de cobertura demonstram que se utilizada, as telhas com adição de fibras vegetais possivelmente não apresentariam vazamentos, manchas ou deslocamentos;

- No teste de flexão os valores encontrados se assemelham com diversas pesquisas com fibras vegetais, que por serem irregulares acarretam a diminuição do valor de resistência a flexão, porém mesmo com esta redução todas as peças tiveram valores superiores para a carga de ruptura exigida pela norma;

- Pode-se concluir com os corpos de prova e com as telhas fabricadas nesta pesquisa, que as fibras influenciaram no modo de ruptura nos elementos cimentícios, podendo se observar a diminuição da velocidade de propagação das fissuras e um comportamento pseudocútil;

- Apesar das dificuldades encontradas para homogeneização das fibras vegetais em meio cimentício, a tendência de utilização de matéria prima vegetal é uma necessidade no mundo atual;

- Como sugestão para pesquisas futuras, se indica a utilização de fibras em comprimentos menores com diferentes percentuais de adição, em outros meios cimentícios, como elementos estruturais e argamassa de assentamento.

Referências

- [1] Fioriti, C. F. *Avaliação de compósitos de concreto com resíduos de borracha na produção de blocos para alvenaria*, Dissertação (Mestrado) Curso de pós-graduação de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 134 f. (2002).
- [2] Izquierdo, I. S. *Uso de fibra natural de sisal em blocos de concreto para alvenaria estrutural*, Dissertação (Mestrado) Curso de pós-graduação de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 128 f. (2011).
- [3] Callister, J.; Willian, D. *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. 7ª edição. Rio de Janeiro: Editora LTC, 724 p. (2011).
- [4] Brigido, J. S. *Estudo do efeito da macrofibra de polietileno e microfibra de polipropileno nas propriedades mecânicas do concreto geopolimérico*, Trabalho de conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 15 f. (2016).
- [5] Gram, H. E. *Durability of natural fibres in concrete*, Relatório da Swedish Cement and Concrete Research Institute, 225 p. (1983).
- [6] Agopyan, V. *Materiais reforçados com fibras para a construção civil nos países em desenvolvimento: o uso de fibras vegetais*, Tese (Livre-Docência), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 204 f. (1991).
- [7] Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), *Produção brasileira de cana-de-açúcar pode chegar a 646 milhões de toneladas*, <http://www.conab.gov.br/imprensa-noticia.php?id=45073>, em 26/08/2017.
- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 15575-5: Edificações habitacionais – desempenho. Parte 5: Requisitos para sistemas de cobertura*, Rio de Janeiro (2013).

- [9] Peralta, G. *Desempenho térmico em telhas: análise de monitoramento e normalização específica*. Dissertação (Mestrado) Programa de pós-graduação em Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia, Universidade de São Carlos, São Carlos, 130 f. (2006).
- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13858-2: Telhas de concreto - Parte 2: Requisitos e métodos de ensaio. Rio de Janeiro (2009).
- [11] Fernandes, D. G. *Desenvolvimento de telha de concreto eco-eficiente utilizando resíduo de mármore do tear de fio diamantado*, Tese (Doutorado) Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, 85 f. (2017).
- [12] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de parede e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, (2005).
- [13] Loh, Y., et al. *Sugarcane bagasse – The future composite material: a literature review*. Resources, Conservation and Recycling, (2013).
- [14] Moubarik A., Grimi N., Bousetta N. *Structural and thermal characterization of Moroccan sugar cane bagasse cellulose fibers and their applications as a reinforcing agent in low density polyethylene*, Composites: Part B (2013).
- [15] Pellegrin, M. Z. *Desenvolvimento de um compósito argamassa/celulose de cana-de-açúcar*, Dissertação (Mestrado) Curso de pós-graduação de engenharia de materiais, Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 93 f., 2017.
- [16] Tita, S., De Paiva, J., Frollini, E. *Resistência ao impacto e outras propriedades de compósitos lignocelulósicos: Matrizes termoficas fenólicas reforçadas com fibras de bagaço de cana-de-açúcar*. Polímeros: Ciência e Tecnologia, 12, n° 4 (2002) 228-239.
- [17] Gurgel, L. V. A. *Mercerização e modificação química da celulose e bagaço da cana-de-açúcar com anidrido succínico e trietilenotetramina: Preparação de novos materiais quelantes para adsorção de Pb(II), Cd(II), Cr (VI) e Cu (II)*, Dissertação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Ouro Preto (2007).
- [18] Colombo, Felipe Sachet et al. *Análise das propriedades físico-mecânicas de argamassas de revestimento com a incorporação de fibras de polipropileno e nylon*, Matéria (Rio de Janeiro), 25, n. 04 (2020).
- [19] Tiscoski, B. L.; Antunes, E. G. P.; Vito, M.; Godinho, D. S. S.; Cemin, G. *Efeito da adição de fibras de polipropileno na resistência de aderência à tração em argamassa de revestimento*. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 12., São Paulo. Anais... São Paulo: GT Argamassas (2017).
- [20] Murta, D. T. S. *Telhas de concreto: Uma análise da fabricação com adição de EPS*, Dissertação (Mestrado) Curso de pós-graduação em processos construtivos, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Belo Horizonte, 82 f. (2016).
- [21] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5733: Cimento Portland com alta resistência inicial. Rio de Janeiro (1991).
- [22] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro (2003).
- [23] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 45: Determinação da massa unitária e volume de vazios. Rio de Janeiro (2009).

- [24] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro (2009).
- [25] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11768: Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro (2011).
- [26] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15900-1: Água para amassamento do concreto – Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro (2009).
- [27] Carvalho, R. R. C., Neto, G. C., Candido, V.S. *Utilização de fibra de sisal com agente de reforço em matriz cimentícia para fabricação de blocos de concreto*. In: 60º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Águas de Lindoia, Anais... São Paulo (2016).
- [28] Borges, A. P. S. N. *Estudo das propriedades de concretos com adição de fibras vegetais e de polipropileno para uso e paredes estruturais*, Dissertação (Mestrado) Curso de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 90f. (2017).
- [29] Silva, F. A. *Durabilidade e propriedades mecânicas de compósitos cimentícios reforçados por fibras de sisal*, Tese (Doutorado) Curso de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 243 f. (2009).
- [30] Henriques, J. D. de O.; Rambalducci, T. C. Pin. V. V.; Frechiani, F. P. P. *Avaliação da viabilidade técnica de produção de telha de fibrocimento usando fibras alternativas*. In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis. Anais... Santa Catarina (2014).
- [31] Savastano Junior, H. *Materiais à base de cimento reforçado com fibra vegetal: reciclagem de resíduos para a construção de baixo custo*, São Paulo: Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Tese de Livre Docência em Materiais e Componentes de Construção (2000).
- [32] Medeiros, A. *Estudo do comportamento à fadiga em compressão do concreto com fibras*, Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 201f. (2012).

Incorporação de fibras híbridas de nylon e polipropileno em argamassas de revestimento

RONCONI Gustavo da Silva^{1, a}, PICCININI Ângela Costa^{2, b}, PIVA JORGE Henrique^{3, c}, WANDERLIND Augusto^{4, d} e ANTUNES Elaine Guglielmi Paveli^{5, e}

^{1, 2, 3, 4, 5} Av. Universitária, Bairro Universitário, Criciúma/SC, 88806-000, Brazil

^a sronconi.gustavo@gmail.com, ^b acp@unesc.net, ^c jhpiva@unesc.net, ^d acw@unesc.net, ^e elainegpa@unesc.net

Palavras-chave: Resistência de aderência, Sistemas de revestimento, reboco, desempenho argamassa.

Resumo. A busca constante por novos materiais que possam ser incorporados nas argamassas de revestimento, a fim de melhorar suas propriedades e seu desempenho em serviço, faz com que as fibras de nylon e polipropileno surjam como possibilidade de um novo material a ser utilizado na composição das misturas. O estudo tem como objetivo a análise do comportamento das argamassas de revestimento, com incorporação de fibras de nylon e polipropileno, de forma simultânea. O procedimento experimental baseou-se na incorporação de 900 g.m⁻³ de fibras de nylon e polipropileno, em distintos percentuais de mistura entre elas. Para obtenção das propriedades das argamassas de revestimento com fibras incorporadas, foram realizados ensaios de consistência, tração na flexão, compressão axial, absorção de água por capilaridade, módulo de elasticidade, resistência de aderência à tração e microscopia eletrônica de varredura. Verificou-se diminuição da consistência das argamassas com incorporação de fibras, contudo, aumentou a resistência à tração por flexão, compressão axial, e aderência à tração. Constatou-se também, que a adição de fibras não apresentou melhorias na absorção de água por capilaridade, entretanto, provocou redução do módulo de elasticidade, e conseqüentemente, aumento da capacidade de absorver deformações.

Introdução

As argamassas de revestimento (AR), são utilizadas com a finalidade de proporcionar o acabamento da edificação, sendo assim, contribuem com o aspecto estético, e conseqüentemente com a valorização do imóvel (SILVA, 2006). No entanto, além de contribuir no aspecto estético, a argamassa de revestimento deve desempenhar funções na edificação. Conforme orienta Hanif et al. (2017), as argamassas devem estabelecer aderência suficiente com o substrato, para que traga proteção aos elementos de vedação, dos componentes da edificação contra os agentes agressivos. Ainda, conforme Hanif et al. (2017), deve fornecer auxílio aos elementos de vedação, nas funções de estanqueidade à água e gases, isolamento térmico/acústico, servir de regularização do substrato para execução do revestimento ou simplesmente servindo de acabamento. Estas funções desempenhadas pela argamassa de revestimento, demonstra sua importância na durabilidade e qualidade da edificação. Segundo Baía e Sabbatini (2000), nota-se em alguns casos, o surgimento de manifestações patológicas, sendo as mais comuns, manchas de umidade, deslocamento da argamassa de revestimento, formação de trincas, e fissuras. Conforme Ralegaonkar et al. (2018), a fissuração do revestimento argamassado, podem ser causadas por movimentações estruturais, movimentações advindas da mudança de temperatura ou umidade do ar.

A fissuração do revestimento argamassado, pode trazer complicações à edificação, conforme Bauer et al. (2016), a presença de fissuras, provoca a diminuição da estanqueidade do revestimento, a degradação acelerada dos componentes de acabamento e o comprometimento da segurança estrutural. Segundo Palomar, Baarlunga e Puentes (2015), as fissuras acarretam o desconforto e o descontentamento do usuário, com a perda de qualidade no isolamento térmico e acústico, devido a facilitação das fendas à propagação do som e do calor através delas.

A incorporação de fibras sintéticas em argamassas torna-se uma opção para o combate da fissuração, sendo difundida no mundo inteiro, tendo como fundamentação, os ganhos na qualidade de argamassas com incorporação de fibras (NAKAGAWA, AKIHAMA, MAHI, 2017). Segundo Song et al. (2018), a adição de fibras em argamassas pode gerar um acréscimo significativo no desempenho dinâmico, na capacidade de absorção de tensões, aumento da ductilidade, e redução da fragilidade da estrutura. As fibras de nylon e polipropileno, surgem como opção de material a ser incorporado como reforço da AR. O polipropileno, é um polímero termoplástico frequentemente utilizado na indústria devido sua baixa densidade, bom regime elástico, e alta resistência ao envelhecimento, possuindo boa capacidade de absorver deformações (JMAL et al., 2018). O nylon, assim como o polipropileno, é um polímero termoplástico, da família das poliamidas, considerado de grande importância para engenharia. Possui baixa densidade, grande capacidade de resistência mecânica, resistência ao desgaste, podendo até substituir peças metálicas com vantagem, devido principalmente à sua grande capacidade de resistência à tração (AN et al., 2017). As fibras de nylon e polipropileno, além de possuírem propriedades e características físicas que contribuem para melhorias nas argamassas de revestimento, possuem vantagens econômicas que viabilizam sua utilização (PALIGA; REAL; CAMPOS FILHO, 2013).

Salienta-se como benefício de utilização destas fibras, propriedades adquiridas com o emprego individualmente de cada uma. Estas melhorias são demonstradas por Orasutthikul, Unno e Yokota (2017), e Alhozaimy, Soroushian e Mirza (1996), que verificaram que o emprego das fibras de nylon e polipropileno, pode elevar a capacidade de resistência a tração em até 41%, além disso, a incorporação destas fibras proporciona um modo de falha mais dúctil, e conseqüentemente, aumento da capacidade de carga da AR. Estas melhorias são proporcionadas, devido ao fato da fibra exercer um papel chamado de ponte de fibra, absorvendo parte dos esforços, sendo necessário romper, contornar ou arrancar a fibra para propagação da fissura (SPADEA et al., 2015). Na distribuição destas fibras no interior da argamassa, deve-se evitar a concentração de fibras, sendo mantida a uniformidade de distribuição, obtendo-se assim melhores resultados (FRANÇA, CARDOSO E PILEGGI, 2016). Com base em amplificar as propriedades adquiridas simultaneamente com fibras de nylon e polipropileno, torna-se importante o estudo da incorporação conjunta destas fibras.

Portanto, o objetivo deste estudo, avalia a influência da incorporação simultânea das fibras de nylon e polipropileno, nas propriedades adquiridas das argamassas de revestimento. Para tal, são avaliadas propriedades como: consistência, resistência à tração na flexão e compressão, módulo de elasticidade estático, absorção de água por capilaridade, bem como resistência de aderência ao substrato.

Materiais e métodos

A metodologia empregada neste trabalho, foi definida com base em pesquisas bibliográficas, de outros estudos já realizados sobre incorporação de fibras sintéticas em argamassas (EZZIANE et al. (2015), SPADEA (2015), ORASUTTHIHUL, UNNO, E YOHOTA (2017), COLOMBO (2018)). Estas pesquisas, serviram de fundamentação para adoção dos tipos de fibras, percentuais de mistura, teores de incorporação, bem como o traço utilizado. A Figura 1, apresenta esquematicamente a metodologia adotada neste estudo.

A areia utilizada na produção da argamassa, foi do tipo areia média lavada. Esta, possui um módulo de finura de 2,37, diâmetro máximo de 2,4mm, definidos conforme NBR NM 248:2003 e massa específica de 2,62g/cm³, valor determinado conforme ensaio previsto pela NBR NM 52:2009.

O aglomerante utilizado no estudo, trata-se de um cimento do tipo Portland CP II -Z 32. Este possui baixo teor de adição, composto por pozolana e apresenta massa específica de 2,95g/cm³, e segue as prescrições da NBR 11578:1991.

Foi empregado na produção das argamassas, cal hidráulica classificada como pertencente a classe HL2. A utilização da cal, teve a finalidade de contribuir com a trabalhabilidade e retenção de água das argamassas produzidas, bem como servir de aglomerante.

A água utilizada em todas as etapas do trabalho, foi obtida diretamente da rede de abastecimento de água da concessionária local, ao qual atende as diretrizes da NBR 15900-10:2009.



Figura 1: Etapas da pesquisa

As fibras incorporadas simultaneamente nas argamassas de revestimento produzidas, foram fibras de nylon e polipropileno, a escolha destas fibras teve base em estudos realizados anteriormente. Os trabalhos realizados por Ezziane et al. (2015), Spadea (2015), Tiscoski et al. (2017) Orasutthikul, Unno e Yokota (2017), Colombo (2018), demonstram uma notória melhoria gerada em argamassas com incorporação de apenas um único tipo de fibra para cada argamassa ensaiada.

As fibras de polipropileno são classificadas como um polímero termoplástico, obtido pelo craqueamento do petróleo, por meio da sintetização de elementos orgânicos (JMAL et al., 2018). Estas fibras possuem um módulo de elasticidade de 3 GPa e massa específica de 0,91g/cm³. As fibras de polipropileno utilizadas neste estudo, são compostas por filamentos finos, com 12mm de comprimento e 18 µm de diâmetro. Sendo assim, conforme especificação do fabricante, sua forma é do tipo circular. De acordo com ensaios de adsorção multimolecular (BET) e de volume dos poros (VTP), realizados com o equipamento Quantachrome Nova Station A, as fibras de polipropileno possuem área superficial de 0,049 m².g⁻¹ e volume total de poros de 0,59x10⁻⁵ cm³.g⁻¹.

As fibras de Nylon são classificadas como um polímero termoplástico, assim como às de polipropileno, e são definidas como fibras de poliamidas, estas formadas a partir da reação de policondensação (AN et al., 2017). Estas, possuem um módulo de elasticidade de 4,76 GPa e uma massa específica de 1,14 g.cm⁻³. As fibras de nylon utilizadas na incorporação das argamassas de revestimento, são constituídas de nylon, compostas por filamentos de 13mm de comprimento e 18 µm de diâmetro, tendo a seção trilobal conforme especificação do fornecedor. De acordo com o ensaio de adsorção multimolecular (BET) e do volume total de poros (VTP), realizados com o equipamento Quantachrome Nova Station A, as fibras de nylon possuem área superficial de 0,116 m².g⁻¹ e volume total dos poros de 0,30x10⁻³ cm³.g⁻¹. A Figura 2, ilustra as imagens das fibras, obtidas por meio de microscopia.

Para realização dos ensaios laboratoriais, foram produzidos quatro argamassas de revestimento, conforme NBR 7200:1998, sendo uma de referência, codificada como AF0, e as demais com codificação de acordo com o percentual de mistura das fibras. O traço utilizado para as argamassas de referência, foi estabelecido em 1:0,5:5 (cimento:cal:areia). O teor de incorporação das fibras nas argamassas estudadas, fixou-se em 900 g.cm⁻³, e a partir deste valor, foram divididas as fibras em percentuais diferentes e iguais, de forma que a soma de massas das duas fibras não ultrapassasse 900 g.cm⁻³.

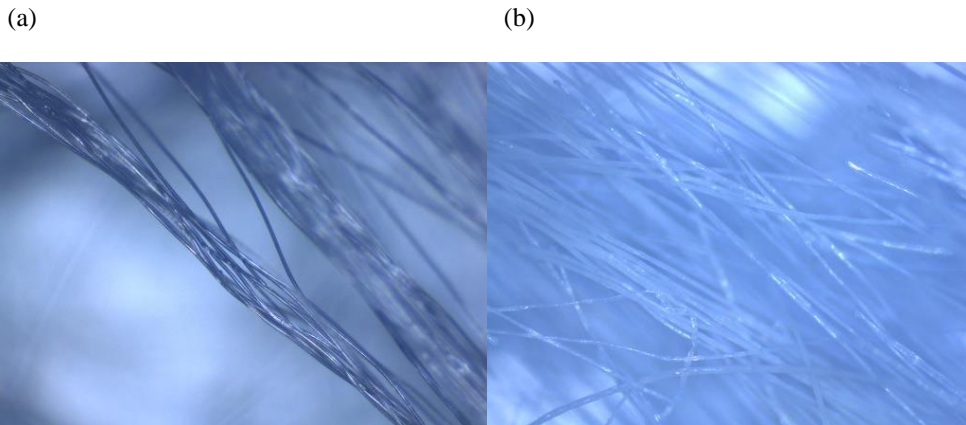


Figura 2: (a)Fibras de nylon, (b) Fibras de polipropileno

Os percentuais de divisão, bem como o teor de incorporação das fibras nas argamassas de revestimento, foram definidos tomando como referência, estudos já realizados neste âmbito, como os trabalhos realizados, Spadea (2015), Tiscoski et al. (2017), França, Cardoso e Pileggi (2016), Colombo (2017). Estes orientam uma incorporação mínima para obtenção de resultados de 500g/cm³, e uma máxima incorporação para evitar novelos no interior da argamassa de 1500g/cm³. Contudo, verificou-se que os melhores resultados foram com valores próximos ao máximo recomendado, justificando a escolha pela fixação em 900g/cm³ de fibras incorporadas.

A Tabela 1 apresenta a codificação dos tipos de argamassas produzidas, bem como uma simplificação dos percentuais misturados e incorporados nas argamassas.

Tabela 1: Caracterização das argamassas produzidas

Argamassa	Quantidade de fibra de nylon (%)	Quantidade de fibra de polipropileno(%)
AF0	0	0
A50N50P	50	50
A25N75P	25	75
A75N25P	75	25

O procedimento experimental deste trabalho foi dividido em duas etapas, sendo a primeira, realizado ensaios com as argamassas em estado fresco, e a segunda, ensaios com as argamassas de revestimento em estado endurecido. O procedimento de mistura das argamassas utilizado para todas as etapas, seguiu as prescrições da NBR 16541:2016, no entanto, as argamassas que tiveram fibras incorporadas na sua mistura, tiveram uma pequena adaptação no processo de mistura. Para evitar a concentração de fibras e garantir uma boa dispersão no interior da argamassa, as fibras foram pré misturadas com o aglomerante e agregados da argamassa, sem adição de água por um tempo fixado de 60 segundos, após os 60 segundos, adicionou-se a água à mistura.

Para determinação do índice de consistência, seguiram-se as prescrições da NBR 13276:2016. Por meio deste ensaio, determina-se a relação água/aglomerante a ser adotada na argamassa. Durante a realização deste ensaio, primeiramente verificou-se a consistência para a argamassa de referência, sem adição de fibras, e posteriormente verificou-se para as argamassas com incorporação de fibras em diferentes composições. A adição de água foi estabelecida seguindo as recomendações da NBR 16541:2016, onde a consistência ideal indicada é de 260 ±5 mm.

Para realização dos ensaios de resistência à tração na flexão e à compressão, absorção de água por capilaridade, módulo de elasticidade estático, e resistência de aderência à tração, foi estabelecida a idade de ensaio em 28 dias, conforme as prescrições normativas.

O ensaio de resistência à tração na flexão e à compressão, seguiu as prescrições da NBR 13279:2005. Para realização do ensaio, foram moldados três corpos de prova para cada composição de argamassa, sendo cada corpo de prova com dimensões de (4x4x16) cm. Para analisar a resistência de tração na flexão, foi utilizado a prensa hidráulica da marca EMIC DL 10000, com uma velocidade de aplicação de carga de (50 ± 10) N/s. Já para o ensaio de compressão axial, utilizou-se uma prensa hidráulica da marca EMIC SSH200, com uma velocidade de aplicação de carga de 500 N/s.

Para determinar a absorção de água por capilaridade e o coeficiente de capilaridade, seguiu-se as prescrições da NBR 15259:2005. Conforme orienta a norma, deve se produzir três corpos de prova seguindo a NBR 13279:2005 para cada tipo de argamassa analisada.

O módulo de elasticidade estático à compressão, foi realizado conforme as prescrições da NBR 8522:2008, no entanto o ensaio teve de ser adaptado para argamassas, adaptações estas relativas aos ciclos de carga e descarga. Foram produzidos três corpos de prova cilíndricos de 5cm de diâmetro e 10 cm de comprimento para cada tipo de argamassa estudada. O equipamento utilizado para realização do ensaio, foi uma prensa hidráulica da marca EMIC PC200CS, juntamente com um extensômetro elétrico.

Para determinação da resistência de aderência das argamassas produzidas, foi realizado o ensaio de resistência de aderência à tração, conforme a NBR 13528:2010. O ensaio sofreu adaptação quanto ao substrato de lançamento das argamassas, estas deveriam ser lançadas em paredes de alvenaria, entretanto, foi realizado o lançamento diretamente sobre blocos cerâmicos individuais, e realizado dois corpos de prova por bloco revestido. Para cada argamassa estudada, deve-se produzir 12 corpos de prova, portanto foram produzidos 48 pontos de arrancamento.

Para realização do ensaio de aderência à tração, foi utilizado um dinamômetro da marca Dinateste, com capacidade para 5 kN. O ensaio iniciou com o acoplamento do equipamento de tração à pastilha, e posteriormente foi aplicado a carga perpendicularmente ao corpo-de-prova, verificando a carga necessária para ruptura. O ensaio foi repetido aos 48 corpos de prova, sendo anotado os valores obtidos em Newton (N), além da forma de ruptura. A Figura 3, ilustra o lançamento da argamassa ao substrato, e a realização do ensaio de aderência.

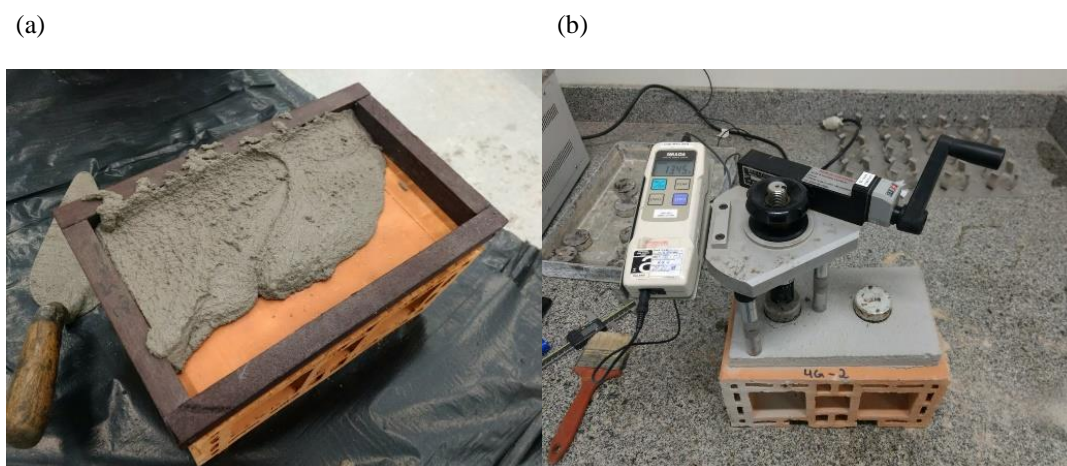


Figura 3: (a) Lançamento da argamassa, (b) realização do ensaio de aderência à tração

Por último, com objetivo de analisar e verificar os compostos e produtos gerados nas argamassas de revestimento com incorporação de fibras, o ensaio de varredura foi efetuado através do equipamento microscópio eletrônico de varredura ZEISS, modelo MA10. As amostras para realização do ensaio, foram produzidas através de lascas do ensaio de compressão axial, sendo posteriormente cortada com o auxílio do equipamento de precisão (ISOMET 1000), permanecendo em estufa posteriormente à uma temperatura de 80 °C, até constância de massa. A análise do MEV foi realizada no laboratório de cerâmica técnica do IDT/UNESC.

Resultados e discussões

Os resultados obtidos neste trabalho são apresentados e discutidos com o intuito de analisar a influência da incorporação de fibras sintéticas nas argamassas de revestimento. Os resultados dos ensaios de absorção de água por capilaridade, compressão axial, resistência a tração na flexão, módulo de elasticidade estático, resistência de aderência à tração, foram analisados pelo método de análise de variância (ANOVA), e pelo teste de comparação de medias (Teste de Tukey). Já os outros resultados apresentados, foram analisados de forma comparativa ou qualitativa.

Para obter-se a relação água/aglomerante adequada ao traço referência adotado, as argamassas produzidas foram submetidas ao ensaio de consistência. Após a realização do ensaio, foi definida a relação água/aglomerante de cada amostra de argamassa produzida. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos neste ensaio.

Tabela 2: Determinação do índice de consistência e relação água/aglomerante

Argamassa	Relação água / aglomerante	Consistência (mm)
AF0	0,93	261,67
A50N50P	0,93	257,67
A25N75P	0,93	255,00
A75N25P	0,93	255,67

De acordo com os valores obtidos, a relação água/aglomerante que atende as condições normativas, para o traço escolhido foi de 0,93. Entretanto, observou-se que a incorporação das fibras na mistura da argamassa, gerou uma redução da consistência em relação à argamassa de referência. Contudo, os resultados encontrados para as argamassas com fibras incorporadas, ficaram dentro da tolerância estabelecida por norma.

Segundo França, Cardoso e Pillegi (2016), a uniformidade na distribuição das fibras no interior da argamassa, contribui com a trabalhabilidade da argamassa. Conforme Silva (2006), e Centofante e Dagostini (2014), a dificuldade de dispersão das fibras, bem como o agrupamento destas em forma de novelos, provocam falhas na mistura, e com isso, o aprisionamento de parte da água da mistura. Este fato, explicaria a redução do índice de consistência com a incorporação das fibras.

Nos ensaios de tração na flexão e compressão, foi possível analisar a influência da incorporação de fibras sintética, na resistência à tração na flexão e compressão, de cada argamassa de revestimento produzida. A Figura 4, apresenta os resultados obtidos nestes ensaios.

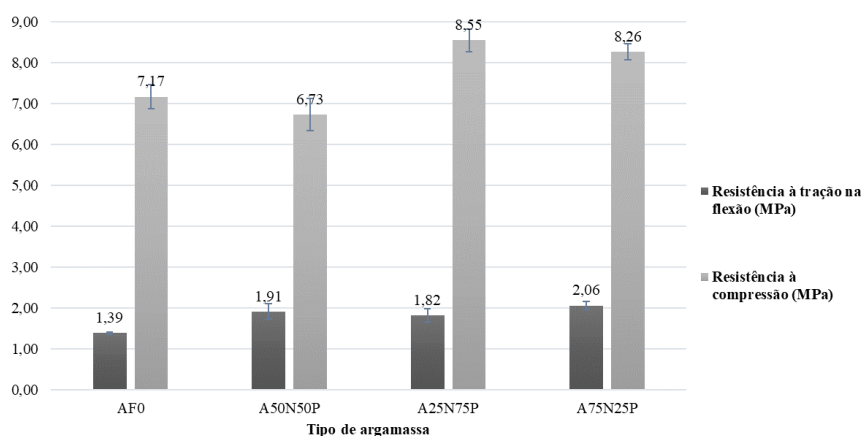


Figura 4: Resultados de resistência de tração na flexão e resistência à compressão

Conforme demonstra a Figura 4, com base na análise estatística, as argamassas que tiveram em sua mistura a incorporação das fibras sintéticas, independente do percentual de mistura entre fibras, apresentaram aumento significativo na resistência à tração na flexão. Ainda segundo os dados estatísticos, notou-se que a maior variação da resistência à tração, em relação a argamassa de referência (AF0), foi a argamassa com maior teor de nylon incorporado (A75N25P), esta apresentou aumento aproximadamente 48% maior.

Os valores encontrados no ensaio de resistência à tração, podem ser explicados pelas características das fibras, que possuem boa resistência mecânica. O nylon principalmente, possui grande capacidade de resistência à tração, em alguns casos pode até substituir peças metálicas, devido à sua grande capacidade de absorver esforços provenientes da tração (AN et al. 2017). A capacidade mecânica do nylon ficou evidente no ensaio, de modo que as amostras em que obtiveram o maior percentual de nylon incorporado, apresentaram os resultados de resistência à tração, com valores mais altos. Todavia, as argamassas com maiores teores de polipropileno, seguiram a tendência dos estudos de Silva (2006), Tiscoski et al. (2017), bem como Colombo (2017), em que verifica-se, que a incorporação de fibras de polipropileno não apresenta melhoria na

resistência a tração, com a mesma eficiência da fibra de nylon. É possível notar, que assim como Orasutthikul, Unno e Yokota (2017), Colombo (2017), Cortez (1999), as argamassas com adição de nylon possuem tendência de elevar o valor da resistência à tração, sendo que esta tendência foi verificada neste estudo.

De acordo com os resultados obtidos no ensaio de compressão axial, observou-se que a incorporação de fibras com teores iguais, apresentaram um valor abaixo do grupo de referência. Entretanto, as análises estatísticas realizadas, apontam que não há variância significativa as amostras de referência e as amostras do grupo A50N50P. As amostras dos grupos em que a mistura de fibras aconteceu em teores diferentes, foi verificado um valor de resistência à compressão axial superior ao grupo de referência, sendo a amostra A25N75P a atingir o resultado mais satisfatório, com cerca de 19% de superioridade. As análises estatísticas realizadas, demonstraram que não há variância significativa para resistência a compressão, entre as amostras A25N75P e A75N25P.

Os resultados de compressão axial não seguiram a tendência que foi averiguada nos estudos de Spadea et al. (2015), Cortez (1999), Colombo (2017). Nestes, foi verificado que a incorporação de fibras de nylon nas argamassas, geram uma melhoria significativa da resistência à compressão, no entanto, as fibras de polipropileno quando incorporadas, não geram melhorias, sendo que no estudo Colombo (2017), as fibras de polipropileno ocasionaram redução da resistência a compressão

Para Prado, Gonzalez (2012), a incorporação simultânea de fibras com propriedades diferentes em argamassas, geram melhores resultados, quando estas são capazes de completar as deficiências uma das outras, para isso, deve-se tomar cuidado na proporção de dosagem entre as fibras. Esta hipótese alicerça os resultados obtidos neste estudo, de modo que as amostras dos grupos que tiveram variação no teor de mistura entre as fibras, alcançaram melhores resultados, no que induz que nestas amostras, as proporções diferentes de mistura, levaram as fibras a suprir as deficiências uma das outras.

Conforme orienta a NBR 15259:2005, a absorção de água por capilaridade foi analisada em dois tempos distintos, aos 10min, e aos 90min. A Figura 05 apresenta os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade.

Nota-se na Figura 5, que os valores encontrados para a absorção de água por capilaridade aos 10min, das amostras com incorporação de fibras, são semelhantes ao valor encontrado para a amostra de referência (AF0). Com base nas análises estatísticas realizadas, essa semelhança é comprovada, demonstrando que não há variância significativa entre as amostras com fibras e a amostra de referência, para absorção aos 10 e aos 90 min. Em comparação aos resultados de Colombo (2017), as amostras com o máximo teor de nylon, tenderiam a apresentar resultados mais satisfatório em relação à argamassa de referência, com valores mais baixos para a absorção de água por capilaridade. Todavia, está tendência provocada pela incorporação de fibras de nylon, ligadas à sua maior capacidade de dispersão, e menor incidência de apresentar novelos no interior da argamassa, diminuindo os poros, não foi verificado neste estudo, possivelmente devido à inserção em conjunto das fibras. Este fato está ligado, possivelmente com as características e propriedades das fibras, principalmente da fibra de polipropileno, que tende a criar novelos, e com isto abertura de poros. De acordo com Garbalinska e Wygocka (2014), as fibras de polipropileno, possuem boa capacidade de fechar poros superficiais, no entanto, internamente, tendem a ter dificuldade de dispersão nas argamassas, gerando vazios em seu interior, e resultando em maior absorção de água. Ainda para Garbalinska e Wygocka (2014), as fibras de polipropileno podem gerar melhorias na absorção de água das argamassas, porém estas, devem ser dosadas em quantidades superiores a 1500g.cm⁻³, e deve-se garantir boa dispersão das fibras no interior da argamassa.

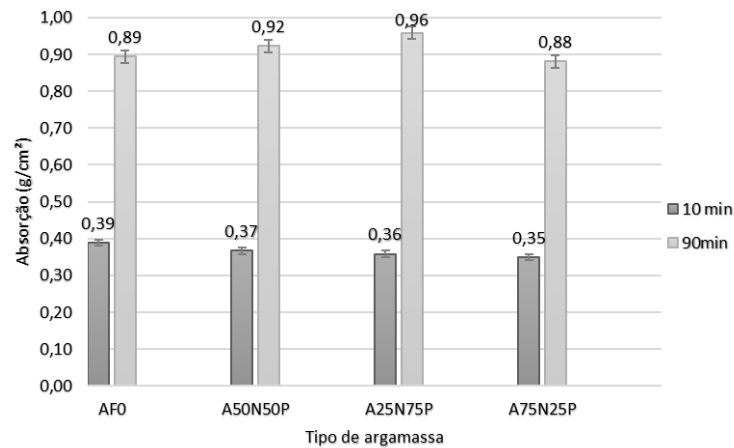


Figura 5: Resultados de absorção de água por capilaridade

Na análise dos resultados obtidos dos módulos de elasticidade estático, nota-se que a incorporação das fibras, resultaram na redução dos valores encontrados no ensaio. A Figura 6 apresenta os resultados alcançados.

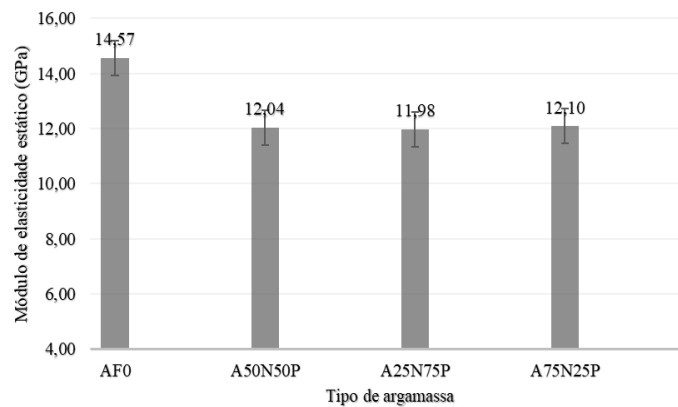


Figura 6: Resultados do módulo de elasticidade estático

Em relação ao grupo de referência (AF0), todos os outros grupos ensaiados, apresentaram uma redução no valor do módulo de elasticidade. A amostra A25N75P, apresentou o valor com maior redução em relação a referência, com cerca de 18%. No entanto, as análises estatísticas realizadas, demonstraram que não há variância significativa entre as amostras com incorporação de fibras.

Em comparação com estudos realizados, foi verificado que a adição de fibras de polipropileno e nylon, geram uma redução do valor do módulo de elasticidade estático. Esta tendência, também constatou-se nos resultados obtidos pelos autores Silva (2006), e Cortez (1999), em que obtiveram redução no valor do módulo de elasticidade estático com a incorporação de fibras de nylon e polipropileno. Os resultados encontrados, demonstraram que o teor de mistura das fibras entre si, não influenciaram nos resultados do módulo de elasticidade estático.

Com a finalidade de observar a dispersão das fibras, porosidade das argamassas, e aderência das fibras à argamassa, foi realizado o ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), com aumentos de 100, 500 e 1000 vezes. Nas imagens obtidas pelo ensaio de MEV, verificou-se que as amostras que tiveram as fibras incorporadas, apresentaram uma porosidade inferior à amostra de referência. A porosidade afeta no comportamento mecânico das argamassas, nos vazios existentes no interior do sólido, gera acúmulo de tensões quando este está sob carga, no qual acarreta a limitação da resistência (SILVA, 2006). Segundo Crescencio e Barros (2013), a resistência à tração e o módulo de elasticidade, estão diretamente ligados com a capacidade da argamassa absorver deformações sem que haja fratura. Ainda para Crescencio e Barros (2013), quanto menor for o módulo de elasticidade, e maior a resistência a tração, maior será a capacidade da argamassa absorver deformações, sem que haja fratura.

Na análise das imagens produzidas pela microscopia, observa-se que as fibras, obtiveram boa aderência com a argamassa, no entanto, a Figura 7b, demonstra um arrancamento da fibra, que pode

ter se originado na preparação da amostra, uma vez que estas foram produzidas a partir de fragmentos gerados no ensaio de compressão axial.

Como mencionado nos resultados de outros ensaio, a dispersão da fibra de nylon no interior da argamassa, acontece de forma mais fácil em relação as fibras de polipropileno, este fato é possível observar na Figura 7c que possui maior quantidade de fibras de polipropileno, e com isto, constata-se o agrupamento de fibras em forma de novelo no interior da argamassa.

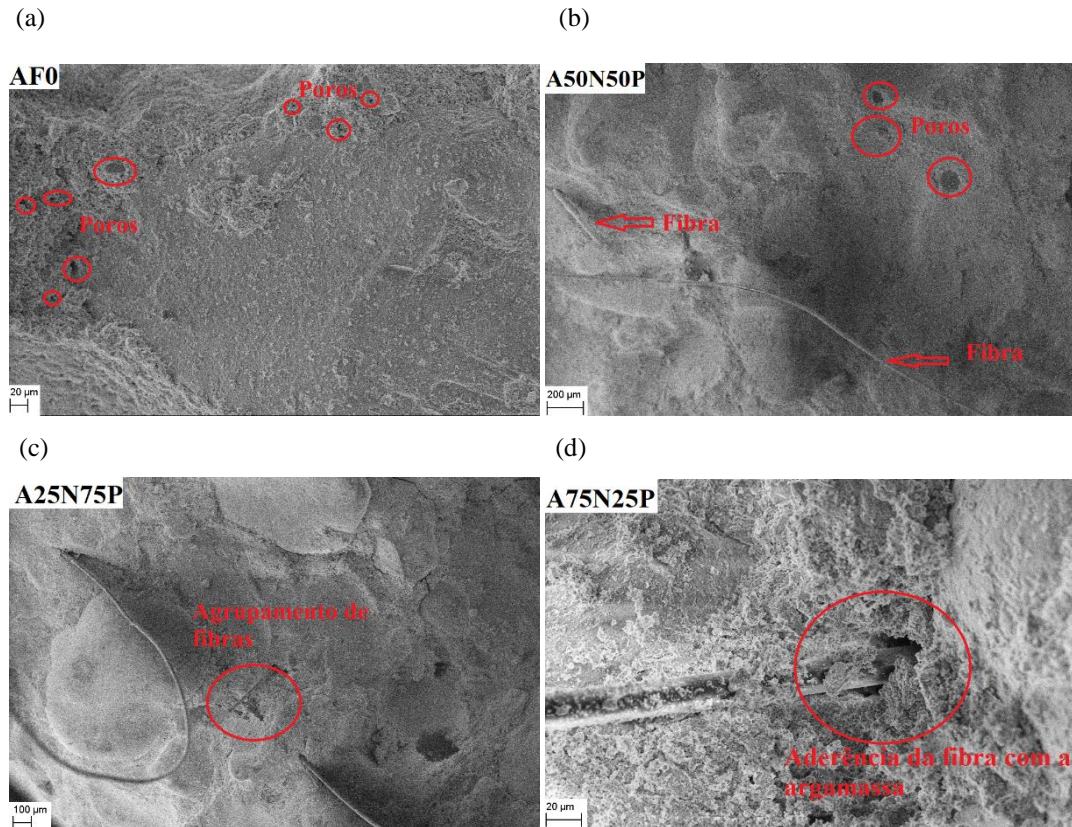


Figura 7: MEV: (a) amostra AF0, (b) amostra A50N50P, (c) amostra A25N75P, (d) amostra A75N25P

Após a realização dos procedimentos antecedentes ao ensaio de aderência à tração, iniciou-se o teste de aderência dos corpos de prova produzido, determinando os valores das cargas necessárias para rupturas. A Figura 8 apresenta os resultados obtidos. As análises estatísticas realizadas com os dados apresentados na Tabela 4, apontaram um aumento expressivo na resistência de aderência das argamassas com incorporação de fibras, em relação à argamassa de referência. As amostras com maiores teores de nylon, foram as que apresentaram os melhores resultados, caracterizado com aumento de 77% em relação a referência para a amostra A75N25P. De acordo com os resultados da Figura 8, conforme a NBR 13749:2013, nota-se que os resultados encontrados estão dentro do valor mínimo estabelecido pela norma, que delimita a resistência de aderência mínima para revestimento argamassado externo, de 0,30 MPa.

Verifica-se que o valor do desvio padrão apresentado para cada amostra, caracterizou-se alto em todos os casos. De acordo com Tiscoski et al. (2017), o alto desvio padrão encontrado está relacionado ao tipo de substrato, a ausência de chapisco, e principalmente o modo de lançamento da argamassa do substrato. Ainda, para Tiscoski et al. (2017), o lançamento da argamassa em blocos individuais e com energia de lançamento reduzida, gera essa discrepância de resultados, fato que não aconteceria em uma parede de alvenaria.

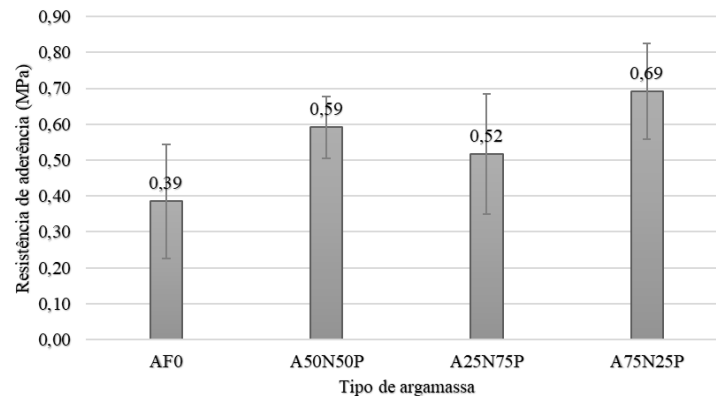


Figura 8: Resistência de aderência à tração

Os resultados obtidos neste estudo, seguiram a tendência evidenciada por Tiscoski et al. (2017), onde a incorporação de fibras sintéticas, eleva significativamente a resistência de aderência em comparação com argamassas sem incorporação de fibras. Este fato, pode ser explicado, devido à porosidade do substrato utilizado, no caso bloco cerâmicos. Esta porosidade de alguma forma, possivelmente permite a penetração de fibras nos poros do bloco cerâmico, conseqüentemente elevando a resistência de aderência.

Conclusões

Por meio da análise comparativa entre os dados obtidos nos ensaios realizados, foi possível verificar que:

- A incorporação de fibras de nylon e polipropileno apresentam redução da consistência da argamassa, sendo a maior redução encontrada em amostras com maior teor de fibras de polipropileno.

- Por meio do ensaio de tração na flexão, verifica-se que a incorporação de fibras provoca aumento da resistência deste quesito, sendo o melhor resultado apresentado pela amostra com maior teor de fibras de nylon;

- Os valores encontrados no ensaio de determinação de resistência a compressão axial, demonstram que as fibras de nylon e polipropileno provocam um acréscimo de resistência quando incorporadas em percentuais diferentes, e em percentuais iguais não apresentam resultados satisfatórios.

- A absorção de água por capilaridade, verifica-se que a incorporação de fibras de nylon e polipropileno, não geram melhoria ou depreciação nos resultados de absorção, apenas apresenta tendência de as argamassas com fibras de polipropileno absorverem maior quantidade de água do que as argamassas com fibras de nylon.

- O módulo de elasticidade estático é diretamente afetado com a incorporação de fibras de nylon e polipropileno nas argamassas de revestimento, gerando redução do valor em relação á amostra de referência (AF0), e conseqüentemente melhorando a capacidade de absorção de deformações.

Com base nos resultados apresentados, conclui-se que as fibras de nylon e polipropileno podem ser utilizadas como reforço das argamassas de revestimento, sobretudo em conjunto. Verificou-se que a utilização em conjunto das fibras em proporções de mistura diferentes, apresentaram os melhores resultados em todos os ensaios. Contudo, os resultados obtidos com os ensaios realizados, demonstraram que a maior quantidade de fibras de polipropileno incorporada, resulta na maior capacidade de resistir a cargas, e conseqüentemente absorver deformações.

Referências

[1] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 11578: Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro (1991).

- [2] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para realização de ensaios. Rio de Janeiro (2016).
- [3] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13276: *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro (2016).
- [4] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro (2005).
- [5] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13528: Revestimento de paredes de argamassas inorgânicas – Determinação da resistência de aderência à tração. Rio de Janeiro (2010).
- [6] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15259: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro (2005).
- [7] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15575: Desempenho de Edificações Habitacionais. Rio de Janeiro (2013).
- [8] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15630: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultra-sônica. Rio de Janeiro (2008).
- [9] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Preparo da mistura para a realização de ensaios. Rio de Janeiro (2016).
- [10] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7175: Cal hidratada para argamassas – Requisitos. Rio de Janeiro (2003).
- [11] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7200: *Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento*. Rio de Janeiro (1998).
- [12] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15900-10: *Água para amassamento do concreto*. Rio de Janeiro (2009).
- [13] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7200: *Execução de revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas – Procedimento*. Rio de Janeiro (1998).
- [14] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13276: *Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência*. Rio de Janeiro (2016).
- [15] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 248: *Agregados – Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro (2003).
- [16] Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 52: *Agregado miúdo – Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro (2009).
- [17] AN, Taehee et al. *Mechanical and optical properties of electrospun nylon-6,6 nanofiber reinforced cyclic butylene terephthalate composites*, Journal Of Industrial And Engineering Chemistry, [s.l.], 55 (2017) 35-39. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2017.06.044>.
- [18] Baía, L. L. M; Sabbatini, F. H. *Projeto e execução de revestimento de argamassa*, São Paulo: O Nome da Rosa (2000).

- [19] Bauer, Elton et al. *Analysis of building facade defects using infrared thermography: Laboratory studies*, Journal Of Building Engineering, [s.l.], 6 (2016) 93-104. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jobee.2016.02.012>
- [20] Colombo, Felipe Sachet. *Análise das propriedades físicos-mecânicas de argamassas de revestimento com a incorporação de fibras de polipropileno e nylon*, Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 28 f. (2017).
- [21] Ezziane, Mohammed et al. *High temperature behaviour of polypropylene fibres reinforced mortars*, Fire Safety Journal, [s.l.], 71 (2015) 324-331. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.firesaf.2014.11.022>.
- [22] França, M. S. de; Cardoso, F. A.; Pileggi, R. G.. *Influence of the addition sequence of PVA-fibers and water on mixing and rheological behavior of mortars*, Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, [s.l.], 9, n. 2 (2016) 226-243. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952016000200005>.
- [23] Hanif, I M et al. *Effect of nylon fiber on mechanical properties of cement based mortar*, Iop Conference Series: Materials Science and Engineering, [s.l.], 271 (2017) 012080-0120888. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/271/1/012080>.
- [24] Jmal, Hamdi et al. *Influence of the grade on the variability of the mechanical properties of polypropylene waste*, Waste Management, [s.l.], 75 (2018) 160-173. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.006>.
- [25] Nakagawa, H.; Akihama, S.; Mahi, F.t.. *Fiber Reinforced Cement Composites*. Reference Module In Materials Science And Materials Engineering, [s.l.], (2017) 1-9. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-803581-8.03969-2>.
- [26] OrasutthikuL, Shanya; Unno, Daiki; Yokota, Hiroshi. *Effectiveness of recycled nylon fiber from waste fishing net with respect to fiber reinforced mortar*, Construction And Building Materials, [s.l.], 146 (2017) 594-602. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.134>.
- [27] Paliga, C. M.; Real, M. V.; Campos Filho, A.. *Análise numérica de vigas de concreto armado reforçadas por compósitos formados por fibras de alta resistência e argamassa de cimento*. Revista Ibracon de Estruturas e Materiais, [s.l.], 6, n. 2 (2013) 211-226. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1983-41952013000200004>.
- [28] Palomar, I.; Barluenga, G.; Puentes, J.. *Lime–cement mortars for coating with improved thermal and acoustic performance*. Construction And Building Materials, [s.l.], 75 (2015) 306-314. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.012>.
- [29] Ralegaonkar, R. et al. *Application of chopped basalt fibers in reinforced mortar: A review*. Construction And Building Materials, [s.l.], 164 (2018) 589-602. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.245>.
- [30] Silva, Rosiany da Paixão da. *Argamassas com adição de fibras de polipropileno – estudo comportamento reológico e mecânico*, Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 191 f. (2006).
- [31] Song, Wei-jie et al. *Mechanical properties and constitutive equations of crumb rubber mortars*, Construction And Building Materials, [s.l.], 172 (2018) 660-669. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.263>.

- [32] Spadea, Saverio et al. *Recycled nylon fibers as cement mortar reinforcement*, Construction And Building Materials, [s.l.], 80 (2015) 200-209. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.075>
- [33] Tiscoski, B. L.; Antunes, E. G. P.; Vito, M.; Godinho, D. S. S.; Cemin, G. Efeito da adição de fibras de polipropileno na resistência de aderência à tração em argamassa de revestimento. In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, São Paulo. Anais... São Paulo: GT Argamassas,12 (2017).
- [34] Crescencio, Rosa Maria; Barros, Mércia Maria S. Boturra. *Tecnologia Construtiva de Revestimento Decorativo Monocamada*. São Paulo: Senai-sp, 103 p. (2013).
- [35] Garbalińska, Halina; Wygocka, Agata. *Microstructure modification of cement mortars: Effect on capillarity and frost-resistance*, Construction And Building Materials, [s.l.], 51 (2014) 258-266. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.091>.

Pavimentos mistos em aço e betão concebidos com vigas metálicas em aço enformado a frio

SILVA Talita L.^{1, a}, VALENTE Isabel B.^{1, b} e BARROS Joaquim A. O.^{1, c}

¹ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal

^aeng.talitalima@gmail.com, ^bisabelv@civil.uminho.pt, ^cbarros@civil.uminho.pt

Palavras-chave: Pavimentos mistos em aço e betão, Aço enformado a frio, Sistemas de conexão.

Resumo. A utilização de vigas metálicas em aço enformado a frio (EF) pode trazer benefícios aos pavimentos mistos em aço e betão: os elementos EF são menos suscetíveis à corrosão e permitem a redução do peso global da estrutura devido à sua pequena espessura. Neste trabalho, propõe-se um pavimento misto que inclui uma disposição inovadora dos perfis metálicos EF. A viga metálica é composta pela associação de perfis EF do tipo C, formando uma secção em U, que é preenchida por betão. Para utilizar conectores de corte adequados ao EF, e garantir o comportamento misto, as abas do perfil posicionado na parte inferior da viga são embebidas no betão. Preliminarmente, foi realizado um estudo analítico de viabilidade do sistema que identificou que a solução permite ser dimensionada para diversas condições (geometria, vãos e cargas atuantes) ao cumprir as exigências regulamentares de segurança. A caracterização do sistema ocorreu de forma experimental, através de ensaios de flexão em vigas simplesmente apoiadas, onde foram avaliados diferentes vãos e pontos de carga e a forma de fixação entre os perfis EF tipo C (por parafusos ou soldadura). Os resultados indicaram compatibilidade das deformações entre os distintos componentes da solução, para níveis de resistência consideráveis, mesmo com a ausência de conectores mecânicos convencionais, até que houvesse deslocamento relativo entre o aço e o betão e início do processo de fendilhação. A forma de conectar os perfis metálicos apresentou grande influência na capacidade resistente e de deformação das vigas mistas em estudo. A falha dos provetes foi condicionada pelos vãos e pontos de carga considerados.

Introdução

Os elementos estruturais devem ser projetados para, além de garantir qualidade e segurança, reduzir os custos, o tempo de execução, a produção de resíduos durante a construção e promover soluções mais sustentáveis. Em alguns casos, as soluções estruturais otimizadas são obtidas com recurso a materiais tradicionais que são dispostos de forma mais eficiente. O uso de pavimentos mistos em aço e betão possibilita atingir alguns destes requisitos sem que a durabilidade e resistência mecânica, condições essenciais para o bom desempenho de qualquer componente estrutural, sejam comprometidas.

A configuração típica de um pavimento misto em aço e betão consiste numa viga metálica do tipo I, que dá suporte a uma laje de betão. O funcionamento misto é obtido quando existe uma transferência eficaz dos esforços de corte entre os diferentes componentes da estrutura. Para que ocorra esta ação, são instalados conectores na viga metálica que, após betonagem, ficam embebidos no betão. Estes conectores são elementos metálicos (por exemplo, os pernos de cabeça) que geralmente são aplicados por soldadura [1, 2, 3].

A laje de betão pode ser betonada sobre uma chapa metálica colaborante, tipicamente com seção trapezoidal, o que dá origem a uma laje mista. A viga metálica é comumente concebida com aço laminado a quente. Todavia, a substituição do aço laminado a quente pelo aço enformado a frio (EF) nas vigas metálicas pode conferir algumas vantagens.

O processo inicial de produção do aço enformado a frio (EF) é similar ao do aço laminado a quente. As diferenças entre estes materiais ocorrem, predominantemente, na fase de formação. Os elementos estruturais em aço EF são produtos metálicos formados a partir do processo de quinagem

ou perfilagem, em temperatura ambiente. Como resultado, são membros estruturais com espessura constante, uniforme e reduzida [4, 5].

Quando os pavimentos mistos em aço e betão são concebidos com aço EF, as vantagens conferidas por estas soluções, em comparação com algumas das soluções tradicionais, são potenciadas pela pequena espessura destes elementos. Além disso, existem outros benefícios a nível estrutural, como a flexibilidade no dimensionamento das seções transversais e a menor suscetibilidade à corrosão, uma vez que os elementos EF são galvanizados. A proteção contra corrosão fornecida pela camada de galvanização pode durar 150 anos e depende das condições de exposição ambiental a qual a estrutura estará sujeita [6, 7, 8].

Os benefícios estruturais resultantes da substituição do aço laminado a quente pelo aço enformado a frio estão diretamente ligados a aspetos ambientais, como a possibilidade da redução dos materiais empregues, a redução dos custos associados com o material e o transporte, e o aumento do ciclo de vida dos elementos estruturais.

Devido ao processo de formação e às dimensões dos elementos, o aço EF possui características mecânicas (propriedades, imperfeições geométricas, tensões residuais, etc) diferentes do aço laminado a quente, e estão mais suscetíveis a instabilidade local e global [6, 7, 8, 9]. Além disso, os conectores tradicionalmente utilizados nos pavimentos mistos não são adequados aos elementos EF devido à forma de aplicação, geralmente realizada por soldadura, e à sua pequena espessura [10, 11].

Na ausência de um sistema eficaz na transferência de esforços de corte, nas vigas mistas de aço e betão, cada material da estrutura deforma-se individualmente e de acordo com suas propriedades, o que ocasiona escorregamento horizontal (*slip*) entre os componentes de aço e de betão, e impossibilita a mobilização total da capacidade de flexão da estrutura.

Por estas razões, estudos foram realizados para desenvolver e avaliar sistemas de transferência de corte adequados para pavimentos mistos em aço EF e betão. Devido às características do aço enformado a frio, alguns destes trabalhos sugerem configurações da seção transversal diferentes das tipicamente utilizadas nos pavimentos mistos em aço e betão [11, 12, 13].

Um dos primeiros estudos desenvolvidos neste âmbito foi conduzido por Malite [2], em 1993. Este autor avaliou o comportamento global de vigas mistas em aço EF e betão, através de ensaios de flexão, e o comportamento de sistemas de transferência de corte, formados por chapas metálicas (cantoneiras) instaladas por soldadura, em ensaios de corte direto.

Alguns anos depois, em 2000, Hanaor [10] desenvolveu sistemas de conexão mecânicos que poderiam ser instalados em vigas mistas com aço EF e betão antes, ou após a betonagem, e conduziu o estudo através de ensaios de flexão e ensaios de corte direto.

Em 2006, Lakkavalli e Liu [11] propuseram uma solução de pavimentos mistos em aço EF e betão na qual a viga metálica fica parcialmente embebida na laje de betão. Para potencializar a transferência de corte, foram realizadas algumas alterações nos banzos embebidos da viga metálica (aberturas circulares, cortes triangulares, instalação de parafusos auto perfurantes).

Na década seguinte, em 2014, Hsu *et al.* [14] desenvolveram um sistema de conexão formado por uma chapa metálica tipo U, enformada a frio, instalada na viga metálica EF tipo I através de parafusos. Foram introduzidas alterações geométricas (cortes e dobras) nos banzos da chapa.

Chen *et al.* [12], em 2018, propuseram uma nova configuração de pavimentos mistos em aço EF e betão com uma viga metálica tipo U, preenchida com betão. A superfície interior da viga metálica era revestida por relevos, mas também foi avaliada a utilização de conectores mecânicos, como parafusos.

Posteriormente, em 2019, Lawson e Taufiq [13] estudaram um sistema de pavimentos mistos em aço EF e betão onde a viga metálica era formada pela combinação de perfis tipo C. Os autores avaliaram o comportamento da estrutura quando os perfis eram posicionados somente na base da viga de betão e quando eram dispostos na base e nas laterais, criando uma seção tipo U. Para maximizar a transferência de corte, foram avaliados sistemas de conexão formados por parafusos (sistemas mecânicos) e por relevos na superfície interior da componente metálica (sistemas por aderência).

Neste trabalho, estuda-se uma nova configuração de pavimentos mistos em aço e betão onde a viga metálica é realizada com aço enformado a frio. Para criar a viga metálica, são utilizados três perfis EF do tipo C, obtidos através de tabelas comerciais. A associação destes perfis forma uma viga metálica do tipo U, que é preenchida por betão, (ver Figura 1). A fim de avaliar a melhor forma de montar a viga metálica, dois tipos de sistemas de fixação entre o perfil posicionado na base e os nas laterais são avaliados, por parafusos auto roscantes ou por soldadura. A laje de betão pode ser betonada sobre uma chapa metálica colaborante, o que resulta numa laje mista. Durante este estudo, almeja-se obter uma adequada e eficaz transferência de corte entre o aço e o betão sem a necessidade de instalar sistemas de conexão na fase de construção, o que permite reduzir custos e tempo de execução. Com isso, após betonagem, as abas do perfil tipo C, posicionado na base da viga, ficam embebidas no betão para proporcionar uma melhor transferência de esforços de corte entre o aço e o betão. A investigação foi conduzida através de estudo analítico [15, 16], para avaliar a viabilidade do sistema, e por meio de experimentais. O estudo experimental engloba ensaios de flexão em vigas mistas, ao simular um trecho do pavimento misto, para avaliar o comportamento global da estrutura.

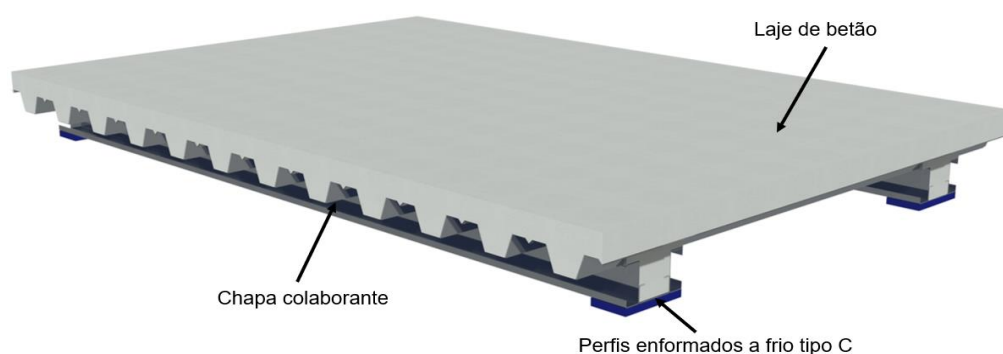


Figura 1: Pavimento misto em aço e betão com vigas metálicas em aço EF estudado nesta investigação.

Estudo da viabilidade do sistema

A primeira análise do sistema de lajes mistas em estudo, neste trabalho, foi realizada a fim de identificar parâmetros fundamentais da solução (geometria transversal, vãos e cargas atuantes) e a sua exequibilidade, tendo em conta a disponibilidade dos perfis EF do tipo C no mercado em Portugal e os requisitos para a verificação de segurança dos Estados Limite Últimos (ELU) e dos Estados Limite de Serviço (ELS) estipulados nas normas em vigor [17, 18, 19, 20].

Durante o estudo analítico foram avaliados parâmetros como: os vãos (entre 5 e 10 m); a sobrecarga, o tipo de utilização (domésticas e residenciais ou escritórios); a classe de resistência do aço (entre S250 e S350); as dimensões dos perfis metálicos - selecionadas de acordo com tabelas comerciais - e; a possibilidade do reforço longitudinal na parte inferior da viga. Para além disso, foram estipuladas algumas condições: o espaçamento entre vigas consecutivas (3 m); a altura total da laje (130 mm); a classe de resistência do betão (C30/37) e a espessura da chapa colaborante (1 mm).

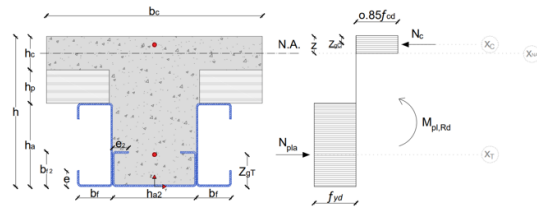
Para realizar as verificações de segurança, foram consideradas as seguintes hipóteses: distribuição plástica das tensões na seção transversal quando esta está sujeita a flexão ou corte; distribuição elástica das tensões na seção transversal para calcular as tensões máximas no aço e no betão, considerando a situação de seção fendilhada, para o cálculo da deformação ao considerar a seção não fendilhada (com coeficientes de homogeneização que assumem tanto carregamentos de longa duração como ações variáveis). Para verificar a deformação, a flecha máxima foi limitada a $L/250$.

A análise realizada [15, 16] mostrou que, o sistema pode ser dimensionado para as dimensões geométricas e níveis de carga considerados de forma que todos os requisitos estipulados nos ELU e ELS possam ser atingidos. Ao dimensionar a solução para condições mais desfavoráveis (maiores vãos e cargas atuantes) estes requisitos podem ser cumpridos ao aumentar a área ou classe de resistência do aço ou aplicar reforço longitudinal na parte inferior da viga mista (ver Tabela 1).

Tabela 1: Vigas mista consideradas no estudo preliminar e verificadas para os ELU e ELS.

Viga	Estado Limite Último (ELU)				Estado Limite de Serviço (ELS)		
	V_{Ed} (kN/m)	$V_{pl,Rd}$ (kN/m)	M_{Ed} (kNm/m)	M_{Rd} (kNm/m)	σ_a (MPa)	σ_c (MPa)	δ_{total} (mm)
L5-D-C1-S280	31,8	48,5	39,7	42,6	211,7	2,5	6,9
L5-D-C2-S250	31,8	57,7	39,8	49,9	164,7	2,3	6,1
L5-E-C2-S250	36,5	57,7	45,7	49,9	187,8	2,5	7,2
L8-D-C3-S250	86,4	207,8	172,8	186,7	194,7	2,8	9,8
L8-E-C3-S280	98,4	232,8	196,8	207,9	220,3	3,0	11,6
L10-D-C4-S320	140,4	332,6	351,0	364,0	252,8	3,7	15,1
L10-D-C4-S350-R1	159,2	363,7	398,0	407,5	276,1	3,8	17,6
Onde,							
L - indica o vão (5, 8 ou 10 m); D ou E - designa o tipo de utilização (residenciais ou escritórios); C - indica as dimensões dos perfis EF do tipo C considerados: C1 = Lateral/Base – C 100×42×1.5 C2 = Lateral/Base – C 100×42×2 C3 = Lateral – C 240×54.5×3 / Base – C 200×52×3 C4 = Lateral/Base – C 300×77×3 S - designa a classe de resistência do aço (S250, S280, S320, S350); R - significa reforço longitudinal (3ø6 - A400).						$\delta_{max} = L/250$ $\sigma_{a,max} = 0,80 f_y$ $\sigma_{c,max} = 0,45 f_{ck}$	

1ª Hipótese – E.N. na laje de betão



Condição: $F_c > F_a$ e $0 < z < h_c$

$$F_c = N_c$$

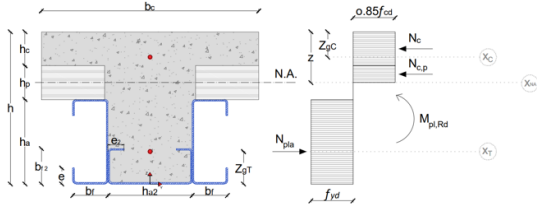
$$F_a = N_{pla}$$

$$N_c = z b_c 0.85 f_{cd}$$

$$N_{pla} = A_a f_{yd}$$

$$M^+_{pl,Rd(x_c)} = N_{pla} \times (h - Z_{gT} - Z_{gc})$$

2ª Hipótese – E.N. na laje de betão e chapa colaborante



Condição: $F_c > F_a$ e $h_c < z < h_c + h_p$

$$F_c = N_c + N_{c,p}$$

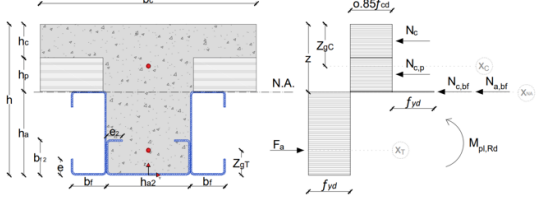
$$F_a = N_{pla}$$

$$N_c = b_c h_c 0.85 f_{cd}$$

$$N_{c,p} = h_{a2} (z - h_c) 0.85 f_{cd}$$

$$M^+_{pl,Rd(x_c)} = N_{pla} \times (h - Z_{gT} - Z_{gc})$$

3ª Hipótese – E.N. nos banzos superiores dos perfis laterais



Condição: $F_c > F_a$ e $h_c + h_p < z < h_c + h_p + t_1$

$$F_c = N_c + N_{c,p} + N_{c,bf} + N_{a,bf}$$

$$F_a = N_{pla} - N_{a,bf}$$

$$N_{c,bf} = h_{a2} (z - h_c - h_p) 0.85 f_{cd}$$

$$N_{a,bf} = 4b_f (z - h_c - h_p) f_{yd}$$

$$M^+_{pl,Rd(x_c)} = F_a \times (h - Z_{gT} - Z_{gc}) - N_{a,bf} \times \left[z - \left(\frac{z - h_c - h_p}{2} \right) - Z_{gc} \right]$$

Figura 2: Equações formuladas, de acordo com [17], para calcular o momento plástico resistente positivo, ao considerar três hipóteses para a posição do eixo neutro (E.N.).

Estudo experimental

Nesta seção apresenta-se o estudo realizado com o objetivo de caracterizar experimentalmente o sistema de vigas mistas proposto, através de ensaios de flexão.

Dimensionamento dos provetes. Com base nas equações formuladas para estimar as propriedades resistentes da seção mista (ver Figura 2), foi realizada uma análise paramétrica para definir a seção transversal (dimensões) e vãos adequados das vigas mistas a serem ensaiadas, considerando os seguintes fatores:

1. As dimensões e propriedades dos perfis enformados a frio são selecionadas consoante a sua disponibilidade no mercado português e procurou-se forçar a posição do eixo neutro (E.N.) entre a laje de betão e os banzos superiores dos perfis do tipo C, o que indica que os perfis EF estarão, predominantemente, sujeitos a tensões de tração e a laje de betão sujeita à compressão;
2. As dimensões da laje de betão são definidas ao considerar a posição do E.N. como referido anteriormente, no ponto 1.
3. Diferentes vãos são selecionados para promover distintos modos de rotura: por flexão (vão = 1,8 m) e por corte longitudinal (vão = 1,2 m);
4. Ausência de reforço com armadura longitudinal;
5. Classe de resistência do betão igual a C30/37 (em concordância com o ponto 1).

Provetes. Os provetes experimentais são simplesmente apoiados e os pormenores estão presentes na Figura 3.

Durante estes ensaios, além de estudar o comportamento global do sistema de vigas propostos, havia o objetivo de avaliar qual a melhor forma de montar a viga metálica. Com isso, duas configurações de vigas mistas foram ensaiadas.

Na primeira configuração, a componente metálica foi construída com os perfis EF tipo C fixados uns aos outros com parafusos auto roscantes do tipo M6 (instalados a cada 200 mm). Estes parafusos foram instalados com a sua cabeça direcionada para o interior da viga mista (ver Figura 3), a fim de reduzir as superfícies de contato com o betão e minimizar possíveis transferências de corte entre o aço e o betão.

Na segunda configuração, estes perfis EF foram fixados através de soldadura, por pontos a arco elétrico com elétrodo revestido, com mesmo espaçamento dos parafusos M6.

Foram considerados dois vãos para cada grupo de vigas mistas (1,2 m e 1,8 m) e para cada vão, foram ensaiadas duas vigas mistas, perfazendo um total de 8 vigas. Em relação à nomenclatura dos provetes, VM significa viga mista, seguido pelo tipo de conexão entre os perfis do tipo C (P, parafusos, ou S, soldadura), e L representa o respetivo comprimento longitudinal (1.3 – correspondente ao vão de 1,2 m – e 1.9 correspondente ao vão de 1,8 m). Para prevenir falha prematura dos perfis EF durante os ensaios, foram instaladas chapas metálicas de reforço (espessura $t = 5$ mm) entre os banzos superior e inferior, na zona dos apoios.

Propriedades dos materiais. O betão foi caracterizado experimentalmente aos 28 dias, segundo os procedimentos descritos em [22], através do módulo de elasticidade ($E_{cm} = 29,2$ GPa), e da resistência à compressão ($f_{cm} = 34,2$ MPa), de acordo com as indicações de [23]. O betão das vigas mistas apresenta as seguintes características: classe de resistência à compressão C30/37; classe de exposição com risco de corrosão induzido por carbonatação XC4; classe de consistência expressa pelo abaixamento S3; classe do teor de cloretos CL 0.40; dimensão máxima do agregado D14. De acordo com a especificação dos fabricantes, os perfis do tipo C de aço EF são da classe S280.

Condições de ensaio. A caracterização experimental foi realizada através de ensaios de flexão, com carregamento estático e de curta duração, em vigas simplesmente apoiadas. As vigas com maior comprimento longitudinal foram ensaiadas com quatro pontos de carga, em 1/4 e 3/4 do vão. As vigas menores foram ensaiadas com uma configuração de carregamento à flexão com 3 pontos, em 1/2 do vão.

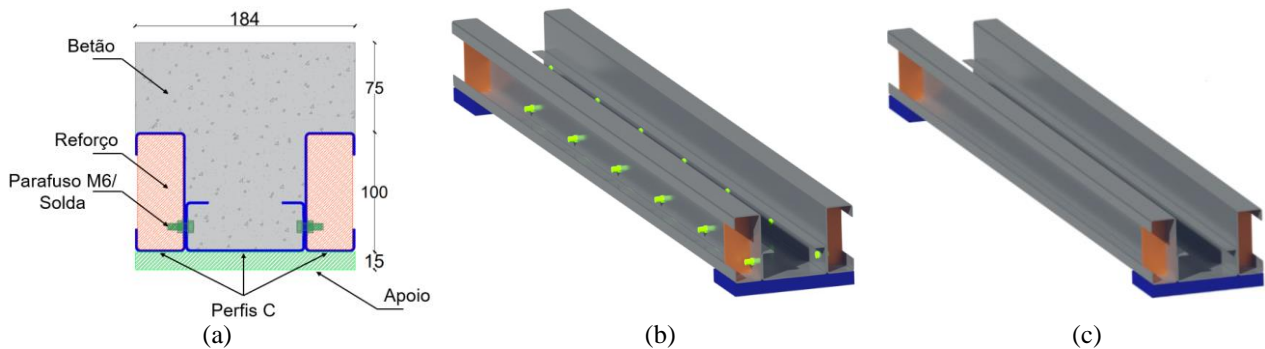


Figura 3: Pormenores das vigas mistas ensaiadas: (a) seção transversal; (b) vista 3D das vigas VM_P_L1.3; (c) vista 3D das vigas VM_S_L1.3.

A força foi aplicada por meio de um equipamento hidráulico, atuador, com capacidade de carga máxima de 300 kN. O ensaio foi governado através do deslocamento do atuador, e seguiu as seguintes etapas:

1. Pré-carga de 5,0 kN inicialmente aplicada para ajustar o provete aos componentes do ensaio (chapas metálicas utilizadas para aplicar a força e suportes);
2. Descarga, até se atingir 0 kN;
3. Provetes carregados com uma taxa de deslocamento de 10 $\mu\text{m/s}$.

Os ensaios foram finalizados quando, na fase de pós-pico, as vigas mistas atingiram uma capacidade de carga de, pelo menos, 50% da capacidade de carga máxima obtida durante o ensaio.

Foram utilizados dois tipos de sensores para realizar as medições durante os ensaios: transdutores diferenciais variáveis lineares (LVDT) e extensômetros unidirecionais (SG). Os LVDTs foram considerados para medir as deformações verticais a meio vão e também os escorregamentos horizontais entre o aço e o betão (*slip*) na extremidade das vigas mistas. Os extensômetros foram utilizados para avaliar o desenvolvimento das deformações nos distintos materiais, ao longo da seção transversal, na zona de meio vão. Neste trabalho, são discutidos os resultados relacionados a capacidade resistente e a deformação vertical (força *versus* deformação) das vigas mistas ensaiadas.

Resultados e discussões

Na Figura 4 apresenta-se as curvas que relacionam a força aplicada dividida pela força máxima atingida (P/P_{max}) com a deformação vertical a meio vão das vigas mistas ensaiadas.

Em relação às vigas com 1,9 m de comprimento com os perfis EF fixados com parafusos, vigas VM_P_L1.9, verifica-se que o comportamento inicial foi marcado por uma fase elástica linear até um primeiro pico de carga ser atingido. Em ambas as vigas ensaiadas, este primeiro pico de carga foi seguido por uma redução da resistência devido à ocorrência de deslocamento relativo entre o aço e o betão, e também ao início da fendilhação na viga de betão. Todavia, os provetes adquiriram resistência para níveis de deformação vertical superiores, até que a máxima capacidade de carga fosse atingida. As perdas e recuperações de capacidade de carga, apresentadas a partir do final da fase elástica, foram decorrentes do desenvolvimento do deslocamento relativo, *slip*, e fendilhação.

Não se verificaram diferenças significativas entre as vigas VM_P_L1.9_01 e VM_P_L1.9_02, mas a viga VM_P_L1.9_02 apresentou um ligeiro aumento da rigidez na fase elástica, para além da maior capacidade resistente (aumento de aproximadamente 6,5% em relação a VM_P_L1.9_01) e maior ductilidade.

Como esperado, o comportamento das curvas que relacionam a resistência e a deformação das vigas com 1,3 m de comprimento, vigas VM_P_L1.3, apresentou algumas diferenças em comparação com as vigas maiores. A fase inicial também foi marcada por um comportamento linear elástico, com elevada rigidez, até que um primeiro pico de carga foi atingido. Este pico também foi seguido por uma redução significativa da capacidade de carga, devido à ocorrência de movimento relativo entre os diferentes componentes da viga mista, e ao início do processo de fendilhação. As vigas VM_P_L1.3 também foram capazes de recuperar capacidade de carga, mas as forças atingidas

durante os níveis de deformação seguintes foram inferiores às que foram medidas no primeiro pico de carga.

As VM_P_L1.3_01 e VM_P_L1.3_02, não evidenciaram diferenças expressivas na fase ascendente da curva. Entretanto, a viga VM_P_L1.3_02 apresentou um leve aumento na capacidade resistente (aproximadamente 8,3%) em comparação com a viga VM_P_L1.3_01. A viga VM_P_L1.3_02 foi capaz de manter o nível de capacidade de carga para maiores valores de deformação.

A forma de ligar os perfis metálicos apresentou uma expressiva influência no comportamento das vigas mistas em estudo. Como se verifica na Figura 4.a, a fase inicial da curva das vigas VM_S_L1.9 foi similar às das vigas VM_P_L1.9. O desenvolvimento do deslocamento horizontal entre o aço e o betão (*slip*) e, conseqüentemente, o início da fendilhação do betão, começaram a ocorrer para um nível de carga próximo do ocorrido para as vigas com parafusos. Porém, após esta ação, não há a mobilização de um sistema adicional, como acontece nas vigas com parafusos M6, para auxiliar na transferência dos esforços de corte entre os diferentes componentes da estrutura. Como resultado, nas vigas soldadas houve uma redução da capacidade máxima de carga e também da ductilidade.

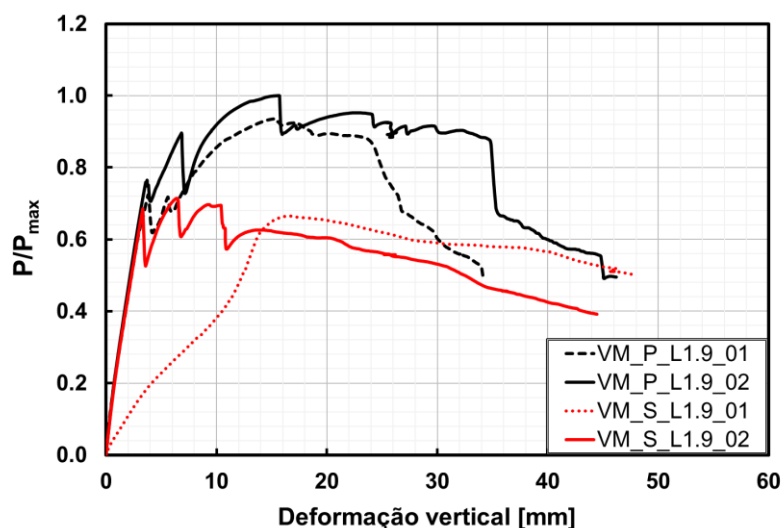
Ao instalar os parafusos com a cabeça direcionada para o interior da viga mista, a contribuição das cabeças dos parafusos no comportamento estrutural das vigas mistas em estudo é inegável (ver Figura 4). Montar a componente metálica com parafusos M6 aumentou a capacidade de carga à flexão em aproximadamente 26,2% nas vigas mistas com 1,9 m (tendo como referência o resultado médio das vigas VM_P_L1.9 e o resultado da viga VM_S_L1.9_02), para além de aumentar a ductilidade.

Durante o ensaio da viga mista VM_S_L1.9_01, ocorreu um problema no equipamento hidráulico de aplicação da carga, que fez com que o atuador aplicasse o carregamento de forma intensa e descontrolada na fase de pré-carga. Por esta razão, a curva da viga VM_S_L1.9_01 é apresentada diferente das restantes e seu resultado foi desconsiderado. Entretanto, acredita-se que esta ação não afetou significativamente a capacidade de carga da viga. Em comparação com a viga VM_S_L1.9_02, a viga VM_S_L1.9_01 apresentou uma redução de aproximadamente 6,9% na capacidade resistente à flexão.

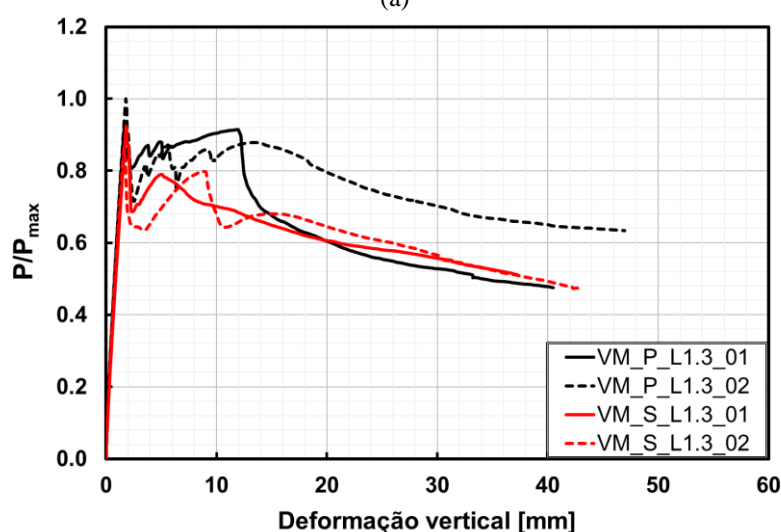
No que concerne às vigas mistas soldadas com 1,3 m de comprimento, VM_S_L1.3, não foram observadas divergências expressivas na fase elástica, em comparação com as vigas montadas com parafusos VM_P_L1.3. O comportamento destes provetes também foi marcado por uma fase linear elástica, com elevada rigidez, até que a capacidade resistente fosse atingida. Após obter a carga máxima à flexão, as vigas VM_S_L1.3 sofreram perda e recuperação de capacidade de carga, mas para níveis de carga inferiores, e que foram mantidas por menores níveis de deformação do que nas vigas VM_P_L1.3. A diferença entre a capacidade resistente das vigas VM_S_L1.3_01 e VM_S_L1.3_02 foi de aproximadamente 6,6%. Novamente, as vigas onde os perfis foram fixados por soldadura, demonstraram uma menor capacidade resistente e de deformação. A redução da capacidade à flexão das vigas menores VM_S_L1.3, em comparação às vigas VM_P_L1.3, foi igual a 6,8%, sendo significativamente inferior ao obtido para as vigas maiores VM_S_L1.9.

A carga máxima atingida pelas vigas durante os ensaios experimentais foi sempre inferior à obtida através das equações apresentadas na Figura 2. Este resultado era expectável, uma vez que as equações (ver Figura 2), foram formuladas assumindo uma ligação total entre o aço e o betão.

Modos de rotura. A rotura dos provetes variou conforme o vão estudado. Nas vigas maiores (L1.9) a falha foi atribuída à combinação de três fatores: primeiro, são desenvolvidos elevados esforços de flexão; segundo, ocorre a falha por corte horizontal na interface entre as superfícies de aço e de betão e; por fim, há falha no betão (corte vertical e esmagamento). Já nas vigas menores (VM_L1.3), a rotura foi governada por corte horizontal e, por fim, também foi observada falha no betão por corte vertical e esmagamento.



(a)



(b)

Figura 4: P/P_{\max} (resistência à flexão) versus deformação vertical a meio vão: (a) vigas VM_L1.9; (b) vigas VM_L1.3.

Após atingir a carga máxima, em fase pós-pico, foram verificadas instabilidade e flambagem local e por distorção nos perfis EF tipo C, em zona próxima da zona de aplicação do carregamento, na alma e banzos. Uma vez que estas instabilidades ocorreram na fase final do ensaio e após a carga máxima ter sido atingida, julga-se que não contribuíram para a falha global dos provetes. A Figura 5 apresenta uma das vigas mistas (VM_P_L1.9_02) após o ensaio.



Figura 5: Provete VM_P_L1.9_02 após o ensaio.

Conclusões

Neste trabalho, avalia-se uma nova configuração de pavimentos mistos em aço e betão com vigas metálicas concebidas com enformado a frio e betão. A investigação foi desenvolvida através de um

estudo analítico de viabilidade do sistema e por meio da caracterização experimental, com base em ensaios de flexão em vigas mistas.

O estudo de viabilidade do sistema permitiu identificar as condições exequíveis do sistema tendo em conta a geometria transversal, vãos e cargas atuantes de acordo com as seções de perfis EF do tipo C disponíveis no mercado português e verificações para o ELU e ELS.

Os ensaios experimentais possibilitaram caracterizar o comportamento da resistência *versus* deformação da solução em estudo. O comportamento global dos provetes foi marcado por uma fase linear elástica, com elevada rigidez, o que indica compatibilidade das deformações entre os distintos componentes, mesmo com a ausência de conectores mecânicos tradicionais, para níveis de carga significativos. Este comportamento foi mantido até que houvesse deslocamento relativo entre o aço e o betão e início do processo de fendilhação. Estas ações promoveram alterações na capacidade resistente e de deformação das vigas mistas em estudo.

Embora as vigas analisadas tenham apresentado similaridades, foram observadas divergências no comportamento consoante a configuração do carregamento aplicado e dos vãos considerados e também da forma de fixação dos perfis EF tipo C.

As vigas maiores, com quatro pontos de carga, apresentaram a capacidade de adquirir resistência após o início do deslocamento relativo e do processo de fendilhação. Porém, a resistência máxima das vigas menores foi condicionada pela ocorrência de *slip*. Este comportamento era expectável e está relacionado com os modos de rotura obtidos.

Relativamente à forma de montagem das vigas metálicas, verificou-se uma grande influência dos parafusos M6 na capacidade resistente e de deformação do sistema para as vigas maiores VM_L1.9. Embora também houvesse aumento da capacidade resistente e ductilidade do sistema quando as vigas VM_L1.3 foram montadas com os parafusos, o aumento destas características foi significativamente inferior. Apesar da tentativa de minimizar o contato entre os parafusos e a componente de betão, os parafusos melhoraram as transferências de corte entre os distintos componentes.

Como expectável, a falha dos provetes foi condicionada pelos vãos e pontos de carga considerados. As vigas maiores falharam pela combinação dos efeitos de flexão, corte horizontal e falha no betão. As vigas menores falharam devido ao corte horizontal e por falha no betão. Foram observadas patologias nos perfis enformados a frio, nomeadamente instabilidade local e por distorção nos banzos e alma, próximo das zonas de aplicação do carregamento. Uma vez que estes mecanismos de falha se desenvolveram após a capacidade resistente ter sido atingida, julga-se que não contribuíram para a rotura global do sistema.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FCT - Fundação para Ciência e Tecnologia, ao abrigo do contrato da bolsa de doutoramento (SFRH/BD/148382/2019) atribuída a Talita Lima Silva.

Referências

- [1] Cruz, P., Valente, I., Veríssimo, G., Paes, J. L., Fakury, R. *Desenvolvimentos Recentes no Domínio da Conexão Aço-Concreto no Contexto das Estruturas Mistas*, Simpósio EPUSP Sobre Estruturas de Concreto, 20 (2006).
- [2] Malite, M. *Análise do Comportamento Estrutural de Vigas Mistas Aço-Concreto Constituídas por Perfis de Chapa Dobrada*, Tese de Doutoramento, Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos (1993).
- [3] Valente, I., Cruz, P. (2009). *Experimental analysis of shear connection between steel and lightweight concrete*, Journal of Constructional Steel Research, 65(10–11) (2009)1954–1963.

- [4] Harini, B., Lingeshwaran, N., Perumal, K., Aravinthan, K. *Sustainable design of cold formed steel*. *Materials Today: Proceedings*, 33 (2020) 881–885. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.406>.
- [5] Yu, W.-W., LaBoube, R. A., Chen, H. *Cold-Formed Steel Design (Fifth edit)*. John Wiley & Sons, Inc (2020).
- [6] Hancock, G. J. *Cold-formed steel structures*, *Journal of Constructional Steel Research*, 59 (2003) 473–487. [https://doi.org/10.1016/S0143-974X\(02\)00103-7](https://doi.org/10.1016/S0143-974X(02)00103-7).
- [7] Yu, C. *Recent Trends in Cold-Formed Steel Construction* (2016).
- [8] Ghersi, A., Landolfo, R., Mazzolani, F. M. *Design of Metallic Cold-formed Thin-walled Members*, Spon Press (2002).
- [9] Gardner, L., Saari, N., Wang, F. *Comparative experimental study of hot-rolled and cold-formed rectangular hollow sections*, *Thin-Walled Structures*, 48(7) (2010) 495–507.
- [10] Hanaor, A. *Tests of composite beams with cold-formed sections*. *Journal of Constructional Steel Research*, 54(2) (2000)245–264.
- [11] Lakkavalli, B. S., Liu, Y. *Experimental study of composite cold-formed steel C-section floor joists*. *Journal of Constructional Steel Research*, 62(10) (2006) 995–1006.
- [12] Chen, Li hua, Li, S. ting, Zhang, H. yang, Wu, X. feng. *Experimental study on mechanical performance of checkered steel-encased concrete composite beam*, *Journal of Constructional Steel Research*, 143 (2018) 223–232.
- [13] Lawson, R. M., Taufiq, H. *Partial shear connection in light steel composite beams*, *Journal of Constructional Steel Research*, 154 (2019) 55–66.
- [14] Hsu, C. T. T., Punurai, S., Punurai, W., Majdi, Y. *New composite beams having cold-formed steel joists and concrete slab*. *Engineering Structures*, 71 (2014) 187–200.
- [15] Silva, Talita L. – *Development of an innovative connection system for cold-formed steel and concrete composite floor*, Thesis Project for the Doctoral Programme in Civil Eng, University of Minho (2022).
- [16] Silva, Talita L., Valente, Isabel B., Barros, Joaquim, A. O., Silva, Jorge O. *Numerical assessment of steel and concrete composite beams with cold formed members*, *The International Colloquium on Stability and Ductility of Steel Structures* (2022).
- [17] NP EN 1994-1-1: 2011 - Eurocódigo 4 - Projecto de estruturas mistas aço-betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.
- [18] NP EN 1993-1-1: 2010. Eurocódigo 3 - Projecto de estruturas de aço, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios
- [19] NP EN 1992-1-1: 2010 - Eurocódigo 2 - Projecto de estruturas de betão, Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios.
- [20] NP EN 1990: 2009 - Eurocódigo 0 - Bases para o projecto de estruturas.
- [21] ATENA 3D (2014). Advanced Tool for Engineering Nonlinear Analysis (Version 5). Červenka Consulting s.r.o. www.cervenka.cz (2014).
- [22] EN 12390-13 – Testing hardened concrete - Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression (2013).
- [23] EN 12390-3 – Testing hardened concrete - Part 3: Compressive strength of test specimens (2011).

Durabilidade de Estruturas Mistas em Aço-Betão Coladas

ROCHA A.¹, AGUIAR J.² e VALENTE I.³

¹Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

²CTAC - Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

³ISISE - Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

¹id7464@alunos.uminho.pt

Palavras-chave: Estruturas mistas em aço e betão, Durabilidade, Aderência, Adesivos estruturais, aço enformado a frio.

Resumo. A utilização mista de materiais baseia-se no aproveitamento do comportamento mecânico específico de cada material. A utilização de estruturas mistas em aço e betão está em constante crescimento e mostra-se eficiente tanto na construção de novas edificações quanto na reabilitação. A procura pelo desenvolvimento sustentável na construção civil está diretamente relacionada com a racionalização da utilização de recursos minerais em conjunto com a redução do desperdício e mau aproveitamento de estruturas. Com este intuito, procura-se desenvolver soluções construtivas que facilitem a reabilitação de construções existentes e sistemas construtivos com alto desempenho em termos de vida útil.

Este estudo está voltado para o tema da sustentabilidade como possível resultado de uma melhor compreensão dos fenómenos associados à durabilidade dos materiais e componentes do sistema construtivo misto em aço e betão e da procura por soluções mais duradouras e otimizadas.

Neste trabalho, pretende-se aprofundar o conhecimento de sistemas mistos de aço e betão, onde são utilizados perfis metálicos enformados a frio e galvanizados, em combinação com diferentes composições de betão, utilizando adesivos estruturais na ligação entre estes componentes. Neste contexto, pretende-se realçar os processos de degradação e a sua influência no comportamento global dos elementos mistos analisados.

Foram realizados ensaios em elementos estruturais em aço enformado a frio colados a elementos em betão, com a finalidade de avaliar a durabilidade dessas estruturas quando expostas a condições ambientais desfavoráveis. Os resultados obtidos mostram que, embora em alguns casos a degradação afete parcialmente a capacidade resistente dos elementos, em outros casos, este tipo de sistema construtivo pode ser utilizado mantendo a capacidade de resistência esperada dos elementos constituintes, mesmo quando expostas a condições extremas.

Introdução

A associação estrutural de diferentes materiais é cada vez mais frequente. Nos sistemas mistos aço-betão retiram-se benefícios do contributo funcional de cada material. Uma maior durabilidade desses materiais e dos elementos construtivos possibilita a ampliação da sua vida útil, resultando numa diminuição do consumo de matérias-primas e numa menor quantidade de resíduos de construção e demolição.

A utilização de adesivos na ligação aço-betão tem potencial em novas construções e em reforço estrutural. Considerando as vantagens associadas à utilização de perfis de aço enformados a frio na construção, julga-se que o conhecimento limitado sobre aderência entre chapa lisa galvanizada e camada de betão, por meio de adesivos estruturais, e sobre a durabilidade desta ligação em situação de exposição a condições ambientais e de carregamento desfavoráveis condiciona a sua utilização.

Este trabalho propõe-se estudar o comportamento e a durabilidade deste sistema de ligação e propor novas soluções mais eficientes.

Utilizar soluções construtivas mais sustentáveis, seja pelo elevado desempenho, poupança na utilização de materiais, maior durabilidade, ou ainda reaproveitamento de materiais e estruturas pré-existentes, é um desígnio para a sociedade e indústria atuais [1], [2]. A combinação de diferentes materiais que acontece nas estruturas mistas aço-betão apresenta vantagens: maior resistência vs. peso, redução da altura total do edifício, elementos estruturais mais esbeltos, maior resistência à flexão, maior rigidez, maior resistência ao fogo, construção mais rápida e flexível, maior durabilidade, etc [3].

As estruturas mistas em aço-betão analisadas associam uma camada de betão armado a um perfil metálico enformado a frio, podendo ser utilizadas em construções novas ou em situações de reforço estrutural. Os conectores correntemente utilizados são os *stud bolts*, mas vários autores salientam o potencial dos adesivos estruturais como elemento de ligação. No entanto, o desempenho a longo prazo, a incerteza em relação aos impactos no meio ambiente e a durabilidade representam uma barreira crítica para a ampla aplicação deste tipo de ligação [4], [5].

O uso de adesivos estruturais tem vindo a crescer em várias indústrias pois são mais sustentáveis do que as ligações convencionais, permitem uma redução no peso e nos custos de produção, e possibilitam flexibilidade no dimensionamento, maior resistência à fadiga e comportamento melhorado sob efeito de vibração e corrosão. Tem também crescido a aplicação da colagem na reparação de estruturas, evitando a reconstrução [5]–[11].

As ligações por colagem estão geralmente sujeitas a quatro tipos de esforços: flexão, tração, corte e torção [6]. Os modos de rotura podem distinguir-se entre rotura coesiva, rotura do adesivo, rotura da colagem (interface entre elemento e adesivo) e rotura combinada. Rotura coesiva ou rotura do adesivo são preferíveis, porque a ligação pode mobilizar a sua máxima capacidade de carga. O processo de colagem influencia a qualidade da ligação e a força transferida na ligação depende das propriedades dos elementos e adesivos. Características como área de colagem, espessura do adesivo, rugosidade e tratamento superficial dos elementos, propriedades químicas do elemento e adesivo, tempo de cura e condições ambientais são as mais influentes na eficiência da ligação [5], [6], [12]–[14]. Neste grupo, apenas as condições ambiente vão variar durante a vida útil da estrutura [13].

A utilização de perfis enformados a frio nas edificações de baixo e médio porte tende a tornar o elemento estrutural mais leve [15], [16]. São geralmente produzidos a partir de chapas de aço galvanizadas com 1,5 mm a 5 mm de espessura e podem assumir várias formas. São geralmente fabricados com um mínimo de 25% de aço reciclado, o que é considerado altamente sustentável [15]–[21].

Estruturas Mistas de Aço-Betão Coladas

A conexão entre aço e betão é geralmente assegurada por conectores de corte, no entanto, esse tipo de conexão tem desvantagens, por exemplo a transmissão de esforços, que não são uniformes ou contínuos.

Em estruturas mistas, o uso de adesivos estruturais como elemento de ligação entre os componentes de aço e de betão tem sido discutido por vários autores. Uma das vantagens deste método é que o adesivo possibilita a transferência contínua do esforço entre o aço e o betão.

Convencionalmente utilizados, os conectores mecânicos causam concentração de tensões e têm pouca resistência à fadiga [3]. Outra falha dessas conexões é a incapacidade de fornecer um alto grau de interação. Além disso, a maior densidade de conectores mecânicos poder prejudicar o processo de betonagem. A Figura 1 mostra uma vista esquemática de um conector mecânico num elemento misto de aço-betão, em comparação com um elemento misto de aço-betão colado.

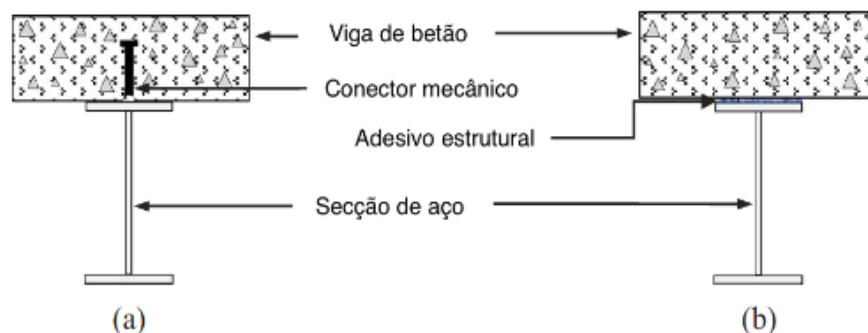


Figura 1: Elemento composto, mecanicamente conectado (a), colado (b) [3]

Vários aprimoramentos nos adesivos estruturais existentes, em conjunto com o desenvolvimento de novos adesivos aumentaram sua aplicabilidade em várias áreas, como o reforço de estruturas existentes e as ligações estruturais. Em comparação com os conectores mecânicos convencionais, os adesivos estruturais oferecem maior homogeneidade na distribuição de tensões, juntamente com uma cofragem reduzida, velocidade de construção acelerada, maior qualidade e melhoria do comportamento à fadiga dos membros. Os adesivos estruturais também podem ser usados para unir membros com elementos transversais finos. Eles atuam como elementos de ligação e fornecem melhor resistência à corrosão e à percolação de água. Devido a estas vantagens, os adesivos são usados para a ligação de partes similares e dissimilares no setor aeroespacial, automotivo, marítimo e da construção civil [3].

De acordo com Berthet et al. [22], investigações para encontrar outros métodos para unir aço e betão foram realizadas por vários laboratórios desde 1962 e, para avaliar o comportamento de estruturas mistas de aço-betão coladas, três tipos de sistemas compostos de aço-betão foram analisados. No primeiro sistema, a laje de betão foi despejada sobre a superfície da viga de aço, onde agregados foram então depositados na resina epoxídica. O segundo sistema consiste em conectar uma laje de betão pré-fabricada com uma viga de aço, utilizando resina fresca. No terceiro sistema, o betão foi despejado diretamente sobre a resina fresca, que cobria a superfície do aço. Os resultados mostraram que o primeiro sistema exibe uma grande deformação, quando comparado aos outros, o segundo sistema é o menos resistente e o terceiro sistema é o mais resistente, porém com o comportamento mais frágil [22].

De acordo com Barnes et al. [8], após estudo sobre a transferência de esforço através da colagem num elemento misto de aço-betão, pode-se concluir que:

- A tensão de corte numa junta adesiva de aço-betão apresenta uma distribuição exponencial, com pico junto da extremidade carregada do elemento;
- O aumento na espessura da cola ou adesivo leva a uma redução geral nos níveis de pico de tensão e um aumento na capacidade resistente global.

Ainda de acordo com Barnes et al. [8], uma análise não linear com elementos finitos bidimensionais de provetes de aço-betão colados produziu um modelo realista, tanto em termos de níveis de tensão quanto a comprimentos de colagem. Com um adesivo com espessura de 1 mm a distribuição de tensão de corte a partir da análise de elementos finitos assemelhava-se mais aos resultados experimentais do que uma análise teórica baseada no método de Volkersen [23]. No entanto, com camadas adesivas mais grossas, de 3 e 5 mm, ambas as abordagens, o método de Volkersen e a análise com elementos finitos, forneceram distribuições de tensão de corte semelhantes. Ambos os métodos de análise são aplicáveis para níveis de carga mais baixos, onde o colapso do betão não acontece [8].

Para as estruturas mistas de aço-betão coladas, a capacidade resistente da estrutura depende principalmente da aderência. É nítido que um desempenho adesivo mínimo da interface aço-betão é necessário para assegurar o comportamento misto da estrutura [22].

Para entender a ligação física de interfaces compostas e a viabilidade de ligação realizada com adesivo, vários autores têm realizado investigações experimentais relacionando a resistência ao

corde com a mudança na espessura da camada de ligação, tal como se apresenta no gráfico da Figura 3.4 [3], [24].

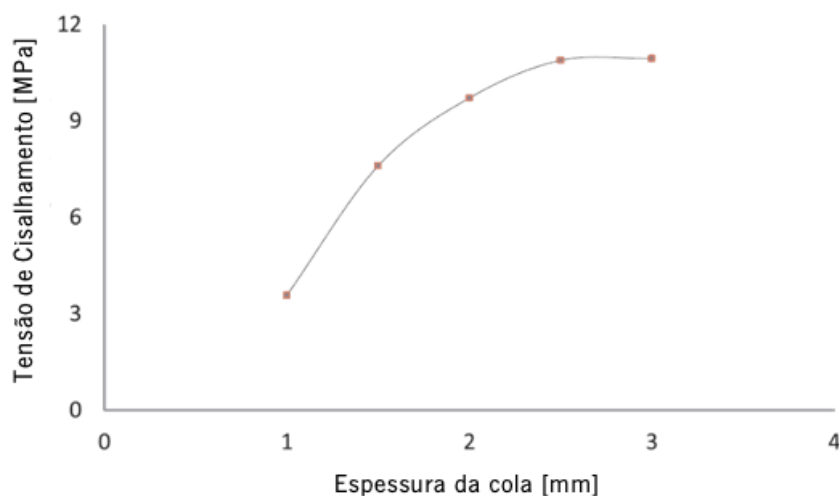


Figura 2: Variação da resistência ao corte em função da espessura de colagem [3]

Programa Experimental

Para tentar entender o comportamento mecânico de um elemento misto de aço-betão que utiliza diferentes tipos de conexões, Berthet et al. [22] sugerem a utilização do ensaio de tipo *push-out*. Em oposição, neste trabalho optou-se pela realização de ensaios de flexão de elementos mistos em aço-betão.

Com a intenção de obter resultados que permitissem avaliar a durabilidade de elementos mistos de aço-betão colados, foi elaborado um plano experimental, iniciado a partir da execução de provetes. Estes provetes foram submetidos a ataques que simularam ambientes agressivos. Posteriormente, estes provetes foram submetidos a ensaios de flexão, permitindo avaliar o seu desempenho e compará-lo com o de outros provetes similares que não foram submetidos a nenhum tipo de ambiente agressivo.

No ensaio de flexão, optou-se pela utilização de provetes de pequenas dimensões, com o objetivo de garantir uma maior amostragem. Optou-se por produzir pequenas vigas de betão com dimensão de $215 \times 50 \times 50$ [mm³], que seriam coladas a elementos metálicos, formando elementos mistos de aço-betão.

Composição do Betão. A dosagem do betão (Tabela 1) foi estudada considerando o Método de Faury, onde se procurou encontrar um valor otimizado para a composição ideal, respeitando os procedimentos e valores indicados pela NP EN 206-1 de 2007 [5], sobretudo no que diz respeito aos valores máximos de razão A/C, valores mínimos de resistência e dosagem de cimento, em função da classe de exposição.

Conforme dito anteriormente, dada a classe de exposição do betão a ser elaborado, optou-se pela utilização de um adjuvante superplastificante, com a finalidade de permitir a produção de um betão com elevada classe de trabalhabilidade, de baixíssima relação A/C, e fluido, durante o tempo necessário para a colocação em moldes, além de apresentar outras vantagens tais como melhoria no acabamento superficial (fator importante quando se trata de uma estrutura que será posteriormente colada) e atingimento de maiores resistências mecânicas às primeiras idades.

Foi utilizada uma quantidade de 1,5% do adjuvante superplastificante MasterGlenium SKY 617, à base de éter policarboxílico, que apresenta elevada manutenção da trabalhabilidade e durabilidade.

Tabela 1: Dosagem do betão

Material	Dosagens por m ³ de Betão	
Cimento	360,00	kg
Brita 4 - 8	682,72	kg
Areia 0 - 4	1238,02	kg
MasterGlenium SKY 617	30,00	kg
Água (w)	113,56	litros

Perfil Metálico. Após comparação entre vários perfis disponibilizados no mercado, e considerando as disposições da NP EN 1994-1 de 2011 [25] no que diz respeito ao dimensionamento de elementos estruturais mistos, optou-se pela utilização de um perfil do tipo ômega em aço galvanizado ($\Omega 90^\circ \text{AR} \times 50 \times 2,5$), com as propriedades geométricas enunciadas na Tabela 2.

Tabela 2: Geometria e secção bruta do perfil

Perfil	b _a [mm]	h _a [mm]	A _a [mm ²]	Z _g [mm]	I _a [mm ⁴]
$\Omega 90^\circ \text{AR} \times 50 \times 2,5$	50,0	50,0	526,2	21,2	188177,9

Após os cálculos realizados com base na NP EN 1994-1 de 2011 [25], os valores da capacidade resistente à flexão da secção adotada e da correspondente máxima carga aplicável durante o ensaio são apresentados pela Tabela 3.

Tabela 3: Valores de momento fletor resistente para a secção transversal adotada

ANÁLISE PLÁSTICA						
A _a [mm ²]	I _a [mm ²]	f _y [kN]	Z (mm)	M _{Rd} [kNm]	P _{rd} [kN]	t _{max,pl} [MPa]
526,2	188178	136,8	58,63	6,5	163,0	28,9
ANÁLISE ELÁSTICA						
A _a [mm ²]	I _a [mm ²]	f _y [kN]	Z (mm)	M _{Rd} [kNm]	P _{rd} [kN]	t _{max,el} [MPa]
526,2	188178	136,8	45,0	5,8	110,1	14,7

Adesivo Estrutural (Cola). A decisão de utilizar uma resina epoxídica como elemento de ligação é resultado do reconhecido desempenho deste tipo de cola nas ligações entre os mais diversos tipos de materiais, inclusive na união entre elementos de materiais distintos.

Para esta campanha experimental, considerando de trabalhos anteriormente realizados, optou-se pela utilização do produto Sikadur 31 EF, uma cola estrutural e argamassa de reparação em dois componentes, à base de resinas epóxi e cargas especiais, isento de solventes, tixotrópico que pode ser aplicado em superfícies com alguma humidade [26].

O provete final obtido, considerando espessura mínima de colagem de 2mm, é representado na Figura 3.

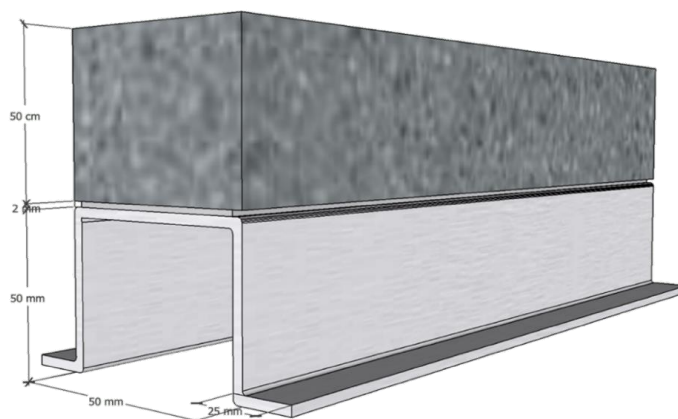


Figura 3: Desenho esquemático do provete

Ambientes Agressivos. Foram realizados ataques químicos em duas soluções aquosas, sendo uma com alta concentração de Cloreto de Sódio - NaCl (105 g/L), e outra uma solução saturada de Sulfato de Magnésio - MgSO₄ (350g/L) [27]. Para acelerar a degradação por exposição aos ambientes foi desenvolvido um sistema para realização de ciclos de 12h, pré-programados e com acionamentos automatizados, de submersão em solução saturada das substâncias, seguido de período de secagem em ambiente controlado, durante 60 dias.

Foram submetidos um total de doze provetes (Figura 4), seis em cada uma das soluções aquosas criadas com a finalidade de que três provetes fossem retirados após 30 dias de ataque em cada uma das duas soluções, e outros três provetes ficassem expostos ao ciclo de ataque por mais 30 dias, totalizando 60 dias de exposição em cada um dos dois ambientes.

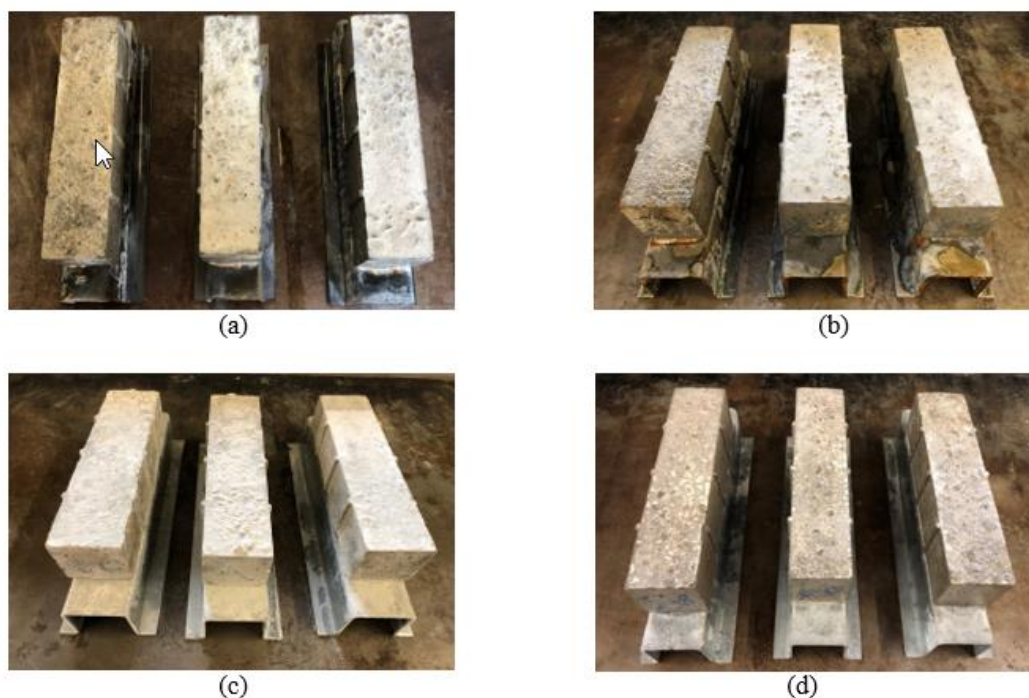


Figura 4: Provetes após exposição de 30 (a) e 60 (b) dias a solução concentrada de NaCl e após exposição de 30 (c) e 60 (d) dias a solução concentrada de MgSO₄

Ensaio. Foram realizados ensaios, submetendo os provetes à flexão em três pontos (Figura 5.a), num total de quinze provetes, sendo doze deles submetidos aos ambientes agressivos já descritos, e três que permaneceram em condições ambientais normais, tratados como referenciais. Foi utilizado um equipamento com atuador servo-controlado, acoplado a uma célula de carga de 200 kN e transdutor interno acoplado. O ensaio foi definido em controlo de deslocamento, utilizando a velocidade de 0,01mm/s. Foram utilizados Transformadores Diferenciais Variáveis Lineares (LVDT's, acrónimo do inglês *Linear Variable Differential Transformer*) conforme apresentado pela Figura 5.b para medir a deformação vertical sofrida pelos provetes e também o escorregamento entre as componentes de aço e betão.

Resultados

Os resultados obtidos mostram variabilidade entre os diferentes grupos de provetes. A Tabela 4 resume os resultados referentes à carga máxima atingida e forma de rotura de cada um dos quinze provetes ensaiados. podemos resultados são subdivididos considerando os cinco grupos definidos com três provetes cada, que estiveram sob as mesmas condições e, portanto, pertencem à mesma família.

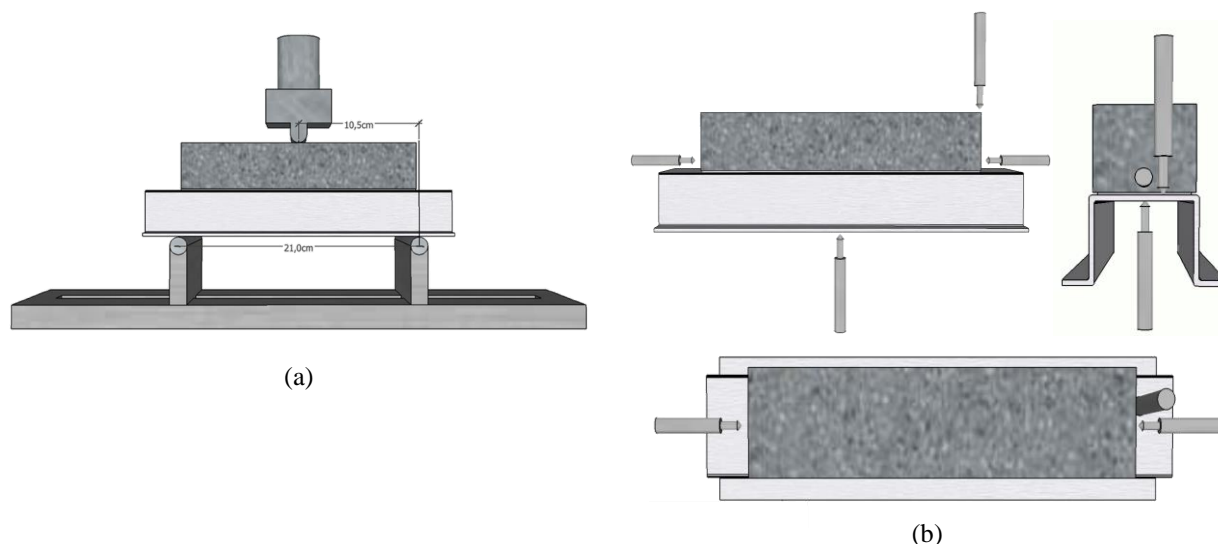


Figura 5: (a) Desenho esquemático do posicionamento dos apoios e aplicação de carga e (b) disposição dos LVDT's

Tabela 4: Tabela comparativa com todos os provetes testados

Provete	Tempo de exposição [dias]	Força máxima - F_{max} [kN]	Rotura observada
GB_REF_1	0	51,51	Corte
GB_REF_2	0	45,82	Corte
GB_REF_3	0	37,91	Corte
	Valor médio de F_{max}	45,08	
GB_NaCl_1	30	48,70	Corte
GB_NaCl_2	30	53,31	Corte
GB_NaCl_3	30	58,33	Corte
	Valor médio de F_{max}	53,45	
GB_NaCl_4	60	33,89	Corte / Flexão
GB_NaCl_5	60	33,68	Corte / Flexão
GB_NaCl_6	60	36,31	Corte / Flexão
	Valor médio de F_{max}	34,63	
GB_MgSO ₄ _1	30	31,49	Flexão
GB_MgSO ₄ _2	30	30,50	Flexão
GB_MgSO ₄ _3	30	29,54	Flexão
	Valor médio de F_{max}	30,51	
GB_MgSO ₄ _4	60	34,30	Flexão
GB_MgSO ₄ _5	60	46,89	Corte / Flexão
GB_MgSO ₄ _6	60	31,55	Flexão
	Valor médio de F_{max}	37,55	

A Figura 6 mostra imagens dos vários provetes após a realização dos ensaios.

Para facilitar a análise, apresentam-se separadamente os resultados relativos aos provetes expostos à solução de cloreto e expostos à solução de sulfatos. A Figura 7 apresenta a relação entre carga aplicada e correspondente deformação medida a meio vão para os provetes expostos à solução de Cloreto de Sódio e para os provetes de referência (não expostos a ambientes agressivos).

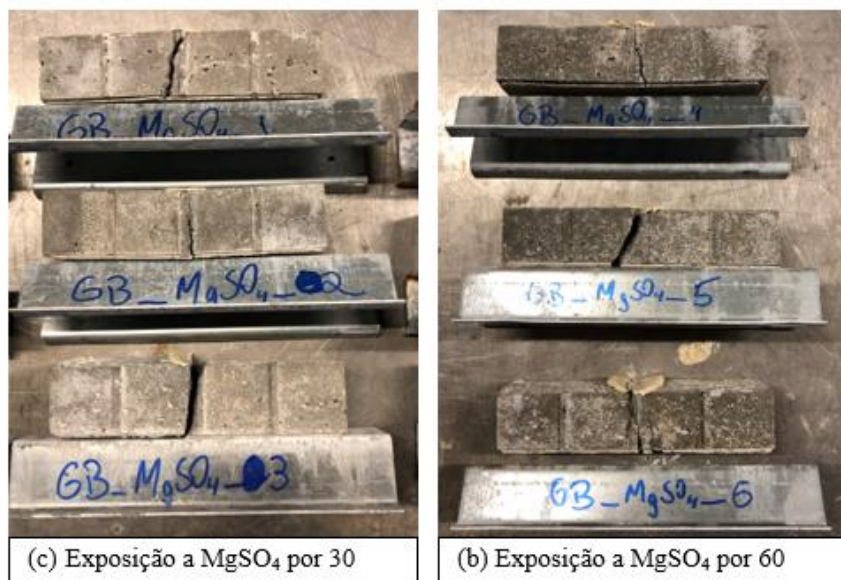
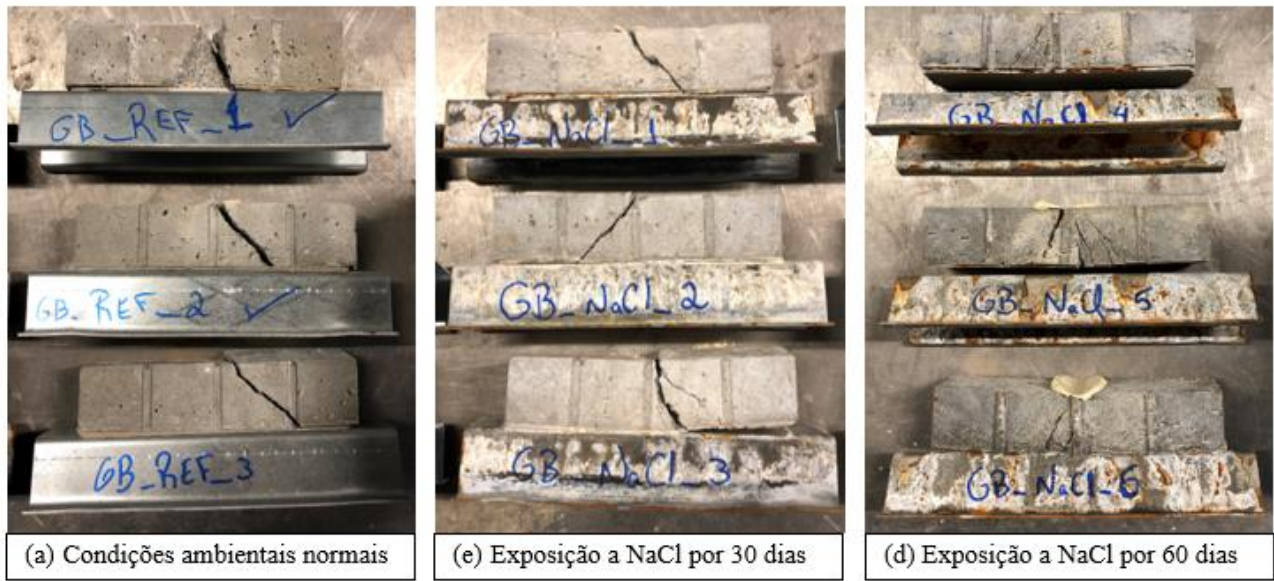


Figura 6: Provetes após testes de flexão em 3 pontos.

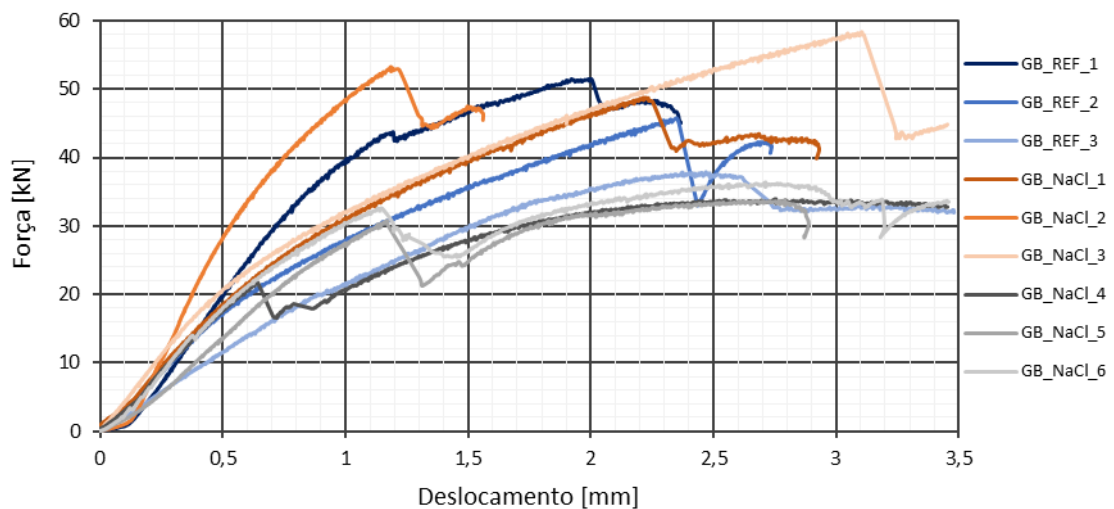


Figura 7: Gráfico Força vs. Deformação (provetes submetidos ao ataque de NaCl)

A partir da análise da relação entre força aplicada e a deformação sofrida a meio vão para os três provetes de cada tipo, pode-se verificar, de acordo com o gráfico apresentado a partir da Figura 7,

que nos primeiros 30 dias de exposição em solução de NaCl não houve degradação dos elementos devido ao ataque, ocorrendo inclusive um incremento de capacidade de carga de aproximadamente 18,5%, que pode ser explicado pelo fato de ter havido maior teor de humidade durante um mesmo tempo de cura do betão e da cola, uma vez que os mesmos foram submetidos a uma solução aquosa. Já para os provetes que ficaram submetidos a um total de 60 dias de exposição em solução de NaCl, a força máxima atingida apresentou um decréscimo de aproximadamente 23,2%, devido à influência da corrosão do aço sobre a colagem, fazendo com que o adesivo estrutural perdesse sua capacidade de ligação entre os elementos de aço e de betão. Em consequência disso, deu-se uma rotura por flexão do betão, após a ser aplicada uma carga de cerca de 30 kN.

Aponta-se para o nível de deformação apresentado pelos provetes, que não evidenciou grandes alterações. Destaca-se que a fissuração do betão nos elementos onde a efetividade da cola foi perdida teve início para valores de deslocamento menores, onde nota-se o abatimento abrupto no percurso das curvas GB_NaCl_4, GB_NaCl_5, e GB_NaCl_6. Após tal abatimento, em todos os provetes deste é possível observar que a curva volta a ter um comportamento ascendente, demonstrando ter capacidade de carga residual.

O comportamento dos provetes expostos a Sulfato de Magnésio quando comparados com os provetes de referência (não expostos a ambientes agressivos) pode ser verificada na Figura 8.

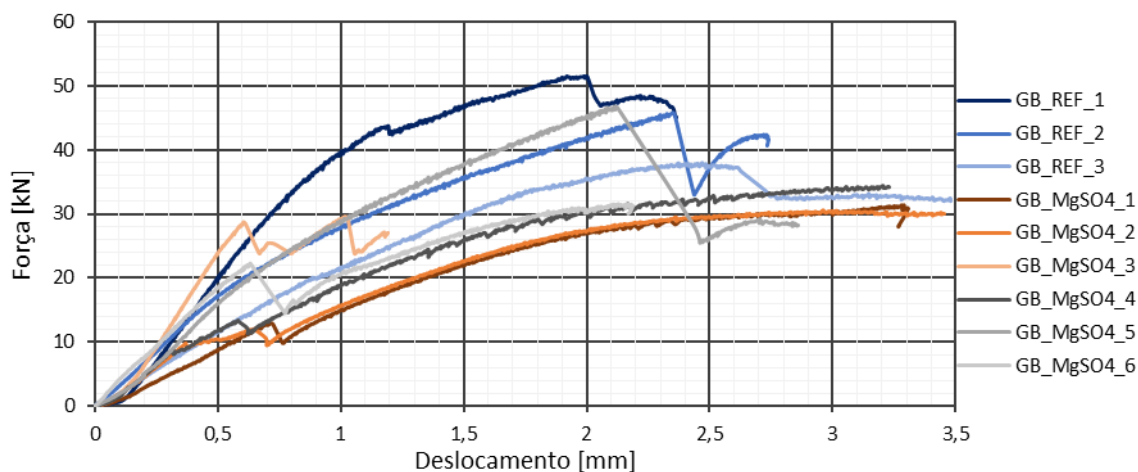


Figura 8: Gráfico Força vs. Deformação (provetes submetidos ao ataque de $MgSO_4$)

Para os provetes expostos à solução de $MgSO_4$, durante 30 dias, verificou-se que a carga máxima atingida foi afetada, apresentando um decréscimo de aproximadamente 32,3% em relação aos provetes de referência. Esse decréscimo deve-se à degradação do betão junto à interface cola/betão, que afeta o desempenho do adesivo estrutural, resultando numa rotura por flexão do betão, após se atingir uma força aplicada da ordem de 30 kN. Para a exposição por um total de 60 dias não foi observada evolução de tal degradação. Novamente aponta-se para o nível de deformação apresentado pelos provetes, que não apresentou grandes alterações.

Conclusão

A análise dos resultados obtidos permitiu identificar que em alguns casos a capacidade de carga dos elementos estruturais mistos colados que foram objeto deste trabalho foi afetada pelos ambientes agressivos a que foram expostos e que o tempo de exposição aos agentes agressivos é um parâmetro relevante na evolução da capacidade resistente. Embora os elementos tenham mantido uma capacidade resistente considerável depois da exposição, há que explorar mais as alterações de comportamento provocadas pelos ambientes agressivos, principalmente a exposição ao sulfato de magnésio ($MgSO_4$), ambiente que provocou uma mudança que ficou patente na curva força vs deslocamento, apontando para uma perda de efetividade da cola ao atingir forças da ordem de 30 kN, além de um padrão de fendilhação e rotura com orientação de 90 graus em relação ao eixo longitudinal do provete.

Os provetes que sofreram exposição à concentração de cloreto de sódio (NaCl) não sofreram com esse efeito, mas após 60 dias de exposição também apresentaram alguma perda de capacidade resistente, sofrendo fissuras para valores de carga mais baixos.

Acredita-se que o adesivo estrutural utilizado na colagem entre os elementos de aço e betão possa ter tido um comportamento muito rígido, o que juntamente com o reduzido vão pode ter tido influência nos resultados apresentados.

Desta forma, considerando os resultados obtidos, uma reanálise às dimensões e propriedades dos materiais constituintes dos provetes aponta para que em trabalhos futuros, é importante considerar, além de outras colas estruturais, novas dimensões e/ou geometrias para os provetes.

Referências

- [1] S. Torgal, F.; Jalali, *Considerações sobre a Sustentabilidade dos Materiais de Construção*, C. Mater., (2010) 2010, <http://hdl.handle.net/1822/28852>.
- [2] L. Bragança and R. Mateus, *Life-cycle analysis of buildings: environmental impact of building elements*, Int. Initiat. a Sustain. Built Environ., 53, no. 9 (2012) 1689–1699. <http://hdl.handle.net/1822/20481>.
- [3] P. Kumar, A. Patnaik, and S. Chaudhary, *A review on application of structural adhesives in concrete and steel–concrete composite and factors influencing the performance of composite connections*, Int. J. Adhes. Adhes., 77, no. March (2017) 1–14, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2017.03.009.
- [4] P. Kumar, S. Chaudhary, and R. Gupta, *Behaviour of Adhesive Bonded and Mechanically Connected Steel-concrete Composite under Impact Loading*, Procedia Eng., 173 (2017) 447–454, doi: 10.1016/j.proeng.2016.12.062.
- [5] S. Budhe, M. D. Banea, S. de Barros, and L. F. M. da Silva, *An updated review of adhesively bonded joints in composite materials*, Int. J. Adhes. Adhes., 72, no. October (2016) 30–42, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2016.10.010.
- [6] L. Sun, C. Li, Y. Tie, Y. Hou, and Y. Duan, *Experimental and numerical investigations of adhesively bonded CFRP single-lap joints subjected to tensile loads*, Int. J. Adhes. Adhes., 95, no. June, (2019) 102402, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2019.102402.
- [7] C. Meaud, B. Jurkiewicz, and E. Ferrier, *Steel-concrete bonding connection: An experimental study and non-linear finite element analysis*, Int. J. Adhes. Adhes., 54 (2014) 131–142, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2014.05.010.
- [8] R. A. Barnes and G. C. Mays, *The transfer of stress through a steel to concrete adhesive bond*, Int. J. Adhes. Adhes., 21, no. 6 (2001) 495–502, doi: 10.1016/S0143-7496(01)00031-8.
- [9] P. Upadhyaya and S. Kumar, *Pull-out capacity of adhesive anchors: An analytical solution*, Int. J. Adhes. Adhes., 60 (2015) 54–62, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2015.03.006.
- [10] A. Souici, J. F. Berthet, A. Li, and N. Rahal, *Behaviour of both mechanically connected and bonded steel-concrete composite beams*, Eng. Struct., 49 (2013) 11–23, doi: 10.1016/j.engstruct.2012.10.014.
- [11] D. Thevenet, R. Créac’hcadec, L. Sohier, and J. Y. Cognard, *Experimental analysis of the behavior of adhesively bonded joints under tensile/compression-shear cyclic loadings*, Int. J. Adhes. Adhes., 44 (2013) 15–25, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2013.01.011.
- [12] A. Ghumatkar and R. Sekhar, *Experimental study on different adherend surface roughness on the adhesive bond strength*, 4 (2017) 7801–7809, doi: 10.1016/j.matpr.2017.07.115.
- [13] C. B. G. Brito, R. C. M. Sales, and M. V Donadon, *Effects of temperature and moisture on the fracture behaviour of composite adhesive joints*, Int. J. Adhes. Adhes., 100 (2020) 102607, doi:

10.1016/j.ijadhadh.2020.102607.

- [14] M. Ferrer, F. Marimon, and M. Casafont, *An experimental investigation of a new perfect bond technology for composite slabs*, *Constr. Build. Mater.*, 166 (2018) 618–633, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.104.
- [15] I. Valente, *Experimental Studies on Shear Connection Systems in Steel and Lightweight Concrete Composite Bridges Estudo Experimental de Sistemas de Conexão para Pontes Mistas de Aço e Betão Leve*, no. April, (2007) 411, <http://hdl.handle.net/1822/8478>.
- [16] S. S. Babu and S. S. Selvan, *Study on the flexural and compressive behavior of cold-formed steel sections with and without lips*, *Mater. Today Proc.*, 37 (2021) 265–272, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.240.
- [17] P. Samiee, S. E. Niari, and E. Ghandi, *Fire performance of cold-formed steel shear wall with different steel grade and thicknesses*, *Structures*, 29 (2021) 751–770, doi: 10.1016/j.istruc.2020.11.073.
- [18] Y. Tao, M. Mahendran, and W. Review, *Fire tests of cold-formed steel walls made of hollow section studs*, *J. Constr. Steel Res.*, 178 (2021) 106495, doi: 10.1016/j.jcsr.2020.106495.
- [19] H. J. F. Diógenes, A. L. H. C. El Debs, and I. B. Valente, *Experimental analysis of new interfaces for connections by adhesion, interlocking and friction*, *J. Constr. Steel Res.*, 110 (2015) 170–181, doi: 10.1016/j.jcsr.2015.03.012.
- [20] C. Hsu, S. Punurai, W. Punurai, and Y. Majdi, *New composite beams having cold-formed steel joists and concrete slab*, *Eng. Struct.*, 71 (2014) 187–200, doi: 10.1016/J.ENGSTRUCT.2014.04.011.
- [21] C. Hsu, P. Munoz, S. Punurai, Y. Majdi, and W. Punurai, *Behavior of composite beams with cold-formed steel joists and concrete slab*, in 21st International specialty conference on cold-formed steel structures, p. 2012, <https://scholarsmine.mst.edu/isccss/21icfss/21icfss-session5/2/>.
- [22] J. F. Berthet, I. Yurtdas, Y. Delmas, and A. Li, *Evaluation of the adhesion resistance between steel and concrete by push out test*, *Int. J. Adhes. Adhes.*, 31, no. 2 (2011) 75–83, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2010.11.004.
- [23] O. Volkersen, *Die Nietkraftverteilung in zugbean spruchten nietverbindungen mit konstanten laschenquerschnitten*, *Luftfahrtforschung*, 15 (1938) 41–7.
- [24] Kumar and P., *Experimental investigations for shear bond strength of steel and concrete bonded by epoxy*, (2013).
- [25] CEN (Comité Europeu de Normalização), NP EN 1994-1 Eurocódigo 4 - Projeto de estruturas mista de aço-betão, *Inst. Port. da Qual.*, p. 130 (2011).
- [26] SIKKA, Sikadur -31 EF, p. 2–5, (2018).
- [27] ASTM, C 88-05 - Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate, *Annu. B. Am. Soc. Test. Mater. ASTM Stand.*, i (2005) 1–5, doi: 10.1520/C0088-05.2.

Comportamento físico de janelas em fibra de vidro

SIMÕES Nuno^{1,2, a}, VIEIRA Nuno^{3,b}, PRATA Joana^{2,c} e VIEIRA António^{2,d}

¹Universidade de Coimbra, CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, Portugal

²Itecons, Coimbra, Portugal

³FWD, Porto, Portugal

^anasimoes@dec.uc.pt, ^bnuno.vieira@boavistawindows.com, ^cjprata@itecons.uc.pt,

^dantonio.vieira@itecons.uc.pt

Palavras-chave: Janelas, caixilho em fibra de vidro, desempenho térmico, estanquidade à água, resistência ao vento, permeabilidade ao ar.

Resumo. A opção por janelas minimalistas é uma tendência arquitetónica que tem tido um franco crescimento no mercado nacional e internacional e que tem despertado o interesse de vários fabricantes por serem sistemas com um valor comercial apreciável, já que são tipicamente comercializadas para preencher vãos de grandes dimensões. O tipo de abertura é principalmente de correr, o que associado à grande dimensão, resulta num conjunto de desafios a ter em conta no desenvolvimento de janelas. O minimalismo é conseguido com recurso à redução da dimensão dos perfis, em particular nas vistas em alçado. A conjugação da reduzida dimensão dos perfis, a tipologia de abertura de correr e as grandes áreas condiciona o comportamento térmico, acústico, permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento.

A opção por perfis não metálicos poderá beneficiar o comportamento térmico e reduzir o impacto ambiental por serem materiais com menor massa volúmica e condutibilidade térmica. No entanto, o seu desenvolvimento tem que ser cuidado de modo a não comprometer a resistência mecânica, já que uma maior deformabilidade dos perfis terá impacto direto nos níveis de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento. A fibra de vidro é um material que pode ser usado para fabricar perfis. O objetivo principal deste trabalho é apresentar a caracterização térmica e física de janelas utilizando esse material.

Baseado nos resultados dos ensaios de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento, assim como nos resultados do cálculo de transmissão térmica, foi possível identificar um conjunto de regras que podem ser usadas para garantir um desempenho satisfatório de janelas de correr minimalistas utilizando fibra de vidro para produzir os perfis. Os ensaios foram realizados no laboratório de Itecons no âmbito do projeto Evoslides, cuja empresa promotora líder é a FWD.

Introdução

O desempenho térmico da envolvente de um edifício depende, principalmente, da qualidade da sua envolvente opaca (paredes, coberturas e pavimentos), mas pode também ser largamente condicionado pelos elementos envidraçados. Como parte integrante das fachadas e coberturas, os vãos envidraçados devem também contribuir para limitar as ações externas, salvaguardando a segurança e o bem estar dos ocupantes. As janelas têm-se tornado cada vez mais relevantes para atingir um bom comportamento energético e a procura de soluções ótimas é uma prioridade entre fabricantes e investigadores ([1],[2]).

O desempenho térmico de uma janela [3] é normalmente caracterizado pelo seu coeficiente de transmissão térmica (U_w), que é calculado de acordo com as metodologias recomendadas nas normas ISO 10077-1:2017 [4] e ISO 10077-2:2017 [5] ou através de ensaios realizados de acordo com o método da Hot-box, de acordo com as normas ISO 8990:1994 [6] e ISO 12567-1:2010 [7]. Este parâmetro depende da transmissão térmica do vidro (U_g) e do caixilho (U_f), bem como da transmissão térmica linear (Ψ) [8], que descreve o fluxo de calor adicional causado pela interação

entre o caixilho e o vidro. Um dos elementos mais críticos nas janelas é o caixilho.

Nos últimos anos, a introdução de vidros duplos e triplos que incluem películas de baixa emissividade e gases inertes, permitiu às janelas atingir um desempenho térmico muito melhor [9]. Esta melhoria pode ser ainda mais significativa quando se opta por espaçadores térmicos não metálicos no perímetro entre vidros, permitindo uma redução de cerca de 10% do valor do U_w ([9],[10]). Por outro lado, poucas alterações têm sido feitas nos perfis dos caixilhos, tanto a nível técnico como no que respeita à seleção de materiais inovadores adequados. O caixilho pode representar cerca de 20% a 30% da área total da janela e corresponde a um ponto fraco termicamente, uma vez que o seu coeficiente de transmissão térmica é, geralmente, muito mais elevado do que o das zonas envidraçadas. Além disso, a concentração de perdas de calor nos caixilhos origina temperaturas baixas à superfície no Inverno, o que contribui para um maior risco de condensação à superfície ([11],[12],[13]).

A madeira foi um dos primeiros materiais utilizados na produção de caixilhos de janelas. No entanto, este é um material que requer uma maior manutenção. Assim, apesar do bom desempenho térmico que apresenta (com valores de U_w que atualmente podem variar entre 1,5 e 2,0 $W/(m^2\text{°C})$ ([4],[2])), os caixilhos de madeira não são uma alternativa na construção intensiva. Uma solução amplamente utilizada é o PVC, que apresenta uma maior resistência térmica comparativamente às soluções de alumínio. Os caixilhos em PVC oferecem valores de U_f que podem variar entre 1,6 e 2,8 $W/(m^2\text{°C})$ [2]. No entanto, os perfis em PVC caracterizam-se por uma baixa rigidez estrutural e são normalmente reforçados com perfis metálicos internos. Por sua vez, os caixilhos de alumínio apresentam valores próximos dos 6 $W/(m^2\text{°C})$. Apesar do seu baixo desempenho térmico, o alumínio é amplamente utilizado devido à sua elevada resistência mecânica e durabilidade. De forma a reduzir os coeficientes de transmissão térmica, os caixilhos de alumínio podem receber um perfil de rotura térmica, muitas vezes feito de poliamida, permitindo valores U_f entre 1,4 e 4,0 $W/(m^2\text{°C})$ ([4],[2]). Para obter desempenhos melhorados, surgiram também no mercado caixilhos que combinam diferentes materiais, tais como alumínio e madeira.

Vários estudos sublinham a importância de seguir novas estratégias para o desenvolvimento de novas soluções com elevado desempenho térmico ([2],[14]) e baixo impacto ambiental [15]. Recentemente, surgiu uma alternativa interessante aos materiais convencionais, que são os perfis de caixilharia em fibra de vidro. Appelfeld *et al.* [1] apresentaram um estudo de perfis de caixilharia de fibra de vidro reforçada. Os resultados apresentam um bom comportamento térmico e mecânico e os perfis em fibra de vidro aparentam ser uma alternativa fiável. Relativamente ao comportamento ambiental, Shiva *et al.* [15] avaliaram o impacto total do Ciclo de Vida (LC) de uma parede virada a sul com soluções envidraçadas e concluíram que o impacto total na parede com janelas de alumínio contribui para o impacto total do LC em cerca de 16-31%, enquanto este valor para janelas com caixilhos em fibra de vidro cai para cerca de 8-23%.

Outros aspetos de grande importância para um bom desempenho das janelas são a estanquidade ao ar e à água e a resistência ao vento [16]. A infiltração do ar devido à baixa estanquidade do ar pode comprometer o desempenho energético dos edifícios [17], bem como o conforto térmico dos moradores [18]. Além disso, um elevado nível de permeabilidade do ar também afeta o comportamento acústico das fachadas [19]. Por outro lado, a falta de estanquidade à água também é indesejável, uma vez que contribui para a deterioração prematura dos elementos de construção nas proximidades das janelas [20]. A resistência ao vento pode ser avaliada experimentalmente de acordo com a norma EN 12211:2016 [21]. A deformação máxima alcançada quando a janela é sujeita a grandes diferenças de pressão é medida e a capacidade de suportar picos de pressão sem falhas pode ser observada. Ao contrário da resistência ao vento, a estanquidade ao ar e à água é difícil de prever e pode ficar comprometida com falhas na fabricação e instalação das janelas [22]. Por este motivo, tanto a permeabilidade ao ar como a estanquidade à água são geralmente determinadas em laboratório, de acordo com as normas EN 1026:2016 [23] e EN 1027:2016 [24], respetivamente. Relativamente à estanquidade, Van Den Bossche [16] realizou recentemente um levantamento exaustivo de estudos experimentais (em laboratório e in-situ), do qual concluiu que as janelas de correr são consistentemente as que apresentam o pior comportamento. Este tipo de

sistema de abertura também compromete a estanquidade, o desempenho térmico e acústico. No entanto, como é frequentemente uma preferência de arquitetos, promotores e proprietários, merece mais ainda ser um alvo de investigação e de desenvolvimentos.

Motivados pelo desafio de desenvolver janelas de correr minimalistas utilizando perfis de fibra de vidro, o objetivo principal do presente estudo é a avaliação térmica de uma nova geração de geometrias de perfis em fibra de vidro. Como parte do desenvolvimento, foi realizado um conjunto de testes laboratoriais a fim de obter níveis de isolamento sonoro aéreo, desempenho em termos de permeabilidade ao ar e à água, bem como a classificação da resistência ao vento para uma geometria semelhante às utilizadas nas janelas convencionais. Baseado nos resultados dos ensaios, foi possível identificar um conjunto de regras que podem ser usadas para garantir um desempenho satisfatório de janelas de correr minimalistas utilizando fibra de vidro. Os ensaios foram realizados no laboratório de Itecons no âmbito do projeto Evoslide, cuja empresa promotora líder é a FWD.

Materiais e Métodos

A subsecção seguinte descreve as geometrias dos perfis utilizados nos ensaios de laboratório e a nova geometria em desenvolvimento, bem como os respectivos cálculos de transmissão térmica.

Descrição dos perfis. Numa primeira fase, foram instalados três provetes de janelas de correr na câmara de ensaios de caixilhos do itecons para serem caracterizados em termos de permeabilidade ao ar, água e vento. As janelas caracterizam-se por terem geometrias de perfil próximas das utilizadas nas janelas convencionais. O primeiro provete, mostrado na Figura 1a), consiste numa janela de correr com duas folhas móveis, com dimensões externas (Altura) x (Comprimento) de 3,0 x 3,0 m. O segundo provete (Figura 1b), em que a preocupação era acrescentar uma terceira folha, tem dimensões externas de 2,25 x 3,84 m. O terceiro provete (Figura 1c) é novamente composto por duas folhas móveis, mas com uma dimensão maior do que o primeiro, 3,0 x 4,8 m.

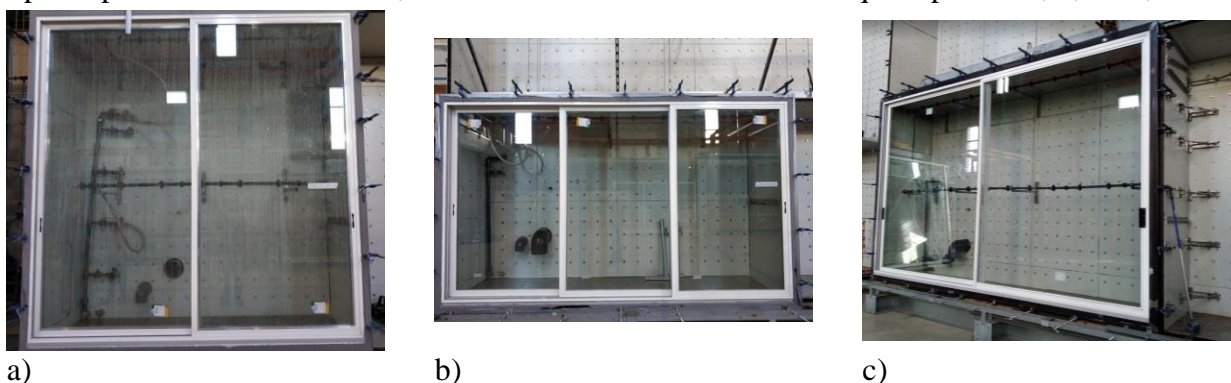


Figura 1: Ensaios de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento: a) janelas de correr com 2 folhas móveis (3,0 m x 3,0 m); b) janelas de correr com três folhas móveis (2,25 m x 3,84 m); c) janelas de correr com duas folhas móveis (3,0 m x 4,8 m).

Em termos de caracterização acústica foram usadas as câmaras reverberantes do Itecons. Foi construída uma parede com uma área de 10 m² num aro. A parede é composta por dois panos de betão separados por uma camada de lã mineral. A parede tinha uma abertura de aproximadamente 7 m² para a instalação do provete de ensaio (uma janela de correr com uma folha móvel com as dimensões nominais de 2,42 m x 2,86 m. A figura 2 mostra a janela dentro das câmaras acústicas.

No âmbito do projeto foram desenvolvidos desenhos para um novo perfil minimalista em fibra de vidro. O cálculo do seu comportamento térmico foi determinado, e depois foram aplicadas medidas de melhoria. Para tal, foi determinado o valor de transmissão térmica (valor U_f) de cada perfil do caixilho (lateral, central e superior). Foi analisado o impacto da redução da espessura dos perfis e do preenchimento das cavidades de ar com um material isolante.



Figura 2: Instalação da janela dentro das câmaras acústicas: a) vista da câmara emissora; b) vista da câmara recetora.

A figura 3 ilustra os desenhos esquemáticos dos perfis minimalistas de fibra de vidro otimizados com um material isolante que preenche as cavidades de ar.

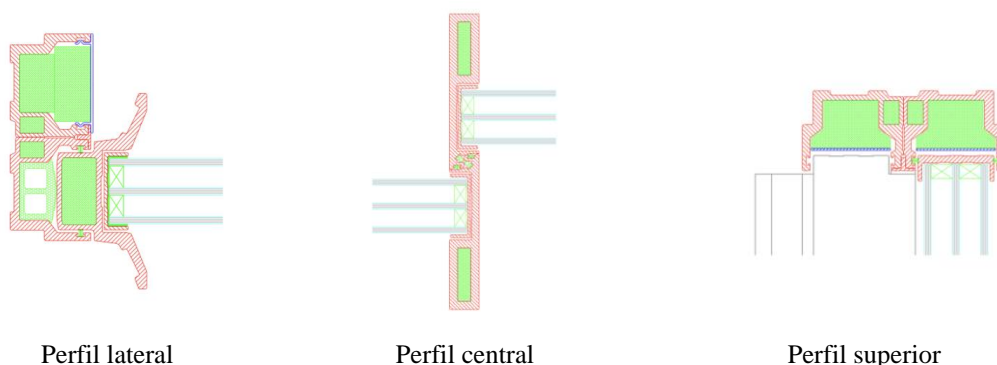


Figura 3: Desenhos esquemáticos dos perfis minimalistas com material isolante (amarelo) a preencher as cavidades de ar.

A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas dos materiais, necessárias ao cálculo de determinação do coeficiente de transmissão térmica dos perfis do caixilho.

Tabela 1: Propriedades físicas dos materiais considerados nos cálculos da transmissão térmica.

Componente	Material	Condutividade térmica [W/(m.°C)]
Perfil do caixilho	Fibra de vidro	0,30
	Polycarbonato	0,20
	Pelúcias	0,14
	EPDM	0,25
	Espuma de isolamento térmico	0,023
Painel isolante (ISO 10077-2)		0,035

Métodos. Nesta subsecção, é feita uma breve descrição dos princípios de ensaios e cálculo realizados. Estes referem-se às principais normas que devem ser seguidas de acordo com a norma de produto das janelas, Norma Europeia EN 14351-1:2006+A2:2016.

Cálculo da transmissão térmica: a transmissão térmica de cada perfil de caixilharia da janela, U_f , foi determinada de acordo com a norma ISO 10077-2:2017 utilizando um método de cálculo numérico bidimensional de acordo com a norma ISO 10211:2017. Para este fim, foi utilizado o software Bisco, da Physibel. O software aplica o método das diferenças finitas Cranck-Nicolson.

Ensaio da permeabilidade ao ar: este teste é realizado de acordo com a norma EN 1026:2016 e baseia-se na aplicação de uma série crescente de pressões de teste (positivas e negativas) no provete de ensaio, determinando-se a sua permeabilidade ao ar através da medição de fluxo de ar que atravessa o provete. O provete ensaiado é classificado de acordo com o especificado na norma EN 12207:2016.

Ensaio de estanqueidade à água: este teste é realizado de acordo com a norma EN 1027:2016. O provete de ensaio é classificado conforme especificado na norma EN 12208:1999. O ensaio consiste na pulverização da superfície do provete de ensaio expectável de ser molhada, de forma contínua e regularmente dispersa, com um caudal especificado de água, enquanto incrementos

positivos de pressão de teste são aplicados em intervalos de tempo regulares. É registado o instante e o local por onde o provete perde a estanquidade.

Ensaio de Resistência ao vento: este teste é realizado de acordo com a norma EN 12211:2016. O provete de ensaios é classificado conforme especificado na norma EN 12210:2016. O ensaio de resistência ao vento subdivide-se na realização de três testes distintos e sucessivos ao provete de ensaio. O primeiro teste (teste de flecha) permite aferir se o provete tem uma deformação admissível ou não. O segundo teste (teste de pressão repetida) testa a capacidade do provete para conservar as suas propriedades. E o terceiro teste (teste de segurança) verifica a segurança dos utilizadores através da sujeição do provete a condições extremas.

Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea, R_w : O teste é realizado no laboratório, em conformidade com a norma ISO 10140-2:2010, utilizando o seguinte procedimento: medição do nível de pressão sonora na sala da fonte para 2 posições de fonte e dentro da gama de varrimento de um microfone em movimento; medição simultânea do nível de pressão sonora na sala recetora durante uma rotação do microfone e para as mesmas 2 posições da fonte emissora dentro da sala da fonte; medição do ruído de fundo dentro da gama de varrimento de um microfone em movimento na sala recetora (com a fonte desligada); avaliação dos tempos de reverberação na sala recetora considerando 1 posição da fonte e 2 medições de decaimentos, pelo menos, para 3 posições de microfone. A curva de isolamento sonoro normalizada é então determinada em conformidade com a norma ISO 10140-2:2010, e o índice de isolamento sonoro é determinado em conformidade com a norma ISO 717-1:2013.

Resultados

Ensaio de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento. A classificação dos provetes em termos de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento foi feita de acordo com as normas de classificação EN 12207:2016, EN 12208:1999 e EN 12210:2016, respetivamente, como mencionado anteriormente.

O primeiro provete com dimensões externas de 3,0 m x 3,0 m atingiu as seguintes classes:

- **Classe 2** para permeabilidade ao ar (a classe 4 é a máxima);
- **Classe 4A** para estanquidade à água (o que significa que a estanquidade foi perdida aos 200 Pa de pressão);
- **Classe B1** para a resistência ao vento (B é a classe de flecha média, 1 é uma resistência muito baixa à pressão do vento).

Para avaliar a influência da utilização de um perfil central reforçado nos resultados dos ensaios, o perfil foi reforçado e os ensaios foram repetidos, conduzindo aos seguintes resultados

- **Classe 2** para permeabilidade ao ar (igual à anterior);
- **Classe 4A** para a estanquidade à água (igual à anterior);
- **Classe B3** para a resistência ao vento (mesma classe de flecha para pressões de vento mais elevadas).

A comparação dos resultados mostra que o reforço permite uma melhoria muito significativa sob a ação do vento. A classe B1 obtida inicialmente significa que, para uma pressão de ensaio de 400 Pa, a flecha frontal relativa foi inferior a 1/200. Após o reforço do perfil central, a deformação frontal relativa medida para uma pressão de ensaio 3 vezes superior (1200 Pa) foi 1/279, sendo menor do que a medida inicialmente.

Para a janela de correr com três folhas móveis (proвете 2) com um perfil central reforçado, os resultados obtidos foram os seguintes:

- **Classe 2** para permeabilidade ao ar;
- **Classe 4A** para a estanquidade à água;
- **Classe C2** (flecha frontal relativa de 1/310) para a resistência ao vento.

Os resultados obtidos permitem-nos concluir que a adição de uma folha não afetou o desempenho do sistema.

O terceiro provete, que era uma janela de correr de duas folhas com uma área muito grande, de 3,0 m x 4,8 m, obteve os seguintes resultados no primeiro conjunto de ensaios:

- **Classe 3** para permeabilidade ao ar;
- **Classe 2A** para a estanquidade à água;
- **Classe A1** (flecha frontal relativa de 1/182) para a resistência ao vento.

Posteriormente, foram feitas as seguintes modificações na janela:

- Alterações no sistema de fixação de reforço central;
- Instalação de componentes de vedação adicionais na zona de cruzamento entre o perfil vertical e o perfil horizontal inferior;
- Instalação de um perfil do tipo goteira reproduzindo um segundo nível de drenagem;
- Instalação de tampa de drenagem com deflectores.

Após a realização das alterações acima mencionadas, os ensaios laboratoriais foram repetidos, e os resultados foram os seguintes:

- **Classe 3** para permeabilidade ao ar;
- **Classe 5A** para a estanquidade à água;
- **Classe B2** (flecha frontal relativa de 1/224) para resistência ao vento.

Estes resultados mostram que os perfis de fibra de vidro podem ser utilizados em janelas de correr e aplicados em zonas em que a ação do vento não seja muito intensa.

Índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea. Foi testada uma janela com uma folha móvel e uma folha fixa. A janela tem dimensões nominais de 2,42 m x (L) 2,86 m e vidros duplos compostos por: vidro de 8 mm termicamente temperado "SGG SECURIT PLANICLEAR (Plux) 8 mm", caixa de ar de 14 mm (90 % Árgon) e vidro laminado de 8,76 mm "SGG STADIP SILENCE 44.2".

Para avaliar o impacto das modificações no sistema de janelas, foram realizados quatro ensaios acústicos. O primeiro teste (Teste 1) permitiu a deteção de pontos fracos no isolamento acústico na área de contacto entre os perfis centrais, particularmente nos topos (inferior e superior). Na primeira tentativa de corrigir estes pontos fracos (testes 2 e 3), foram aplicadas as seguintes medidas: reforço do isolamento do perfil inferior da folha fixa; aplicação de uma junta de borracha na zona de contacto entre a folha fixa e a folha móvel; e melhoria da vedação das partes superiores do perfil central da folha fixa. Finalmente (Teste 4), os perfis da folha fixa foram preenchidos com lã mineral e a selagem da zona da ombreira foi melhorada com perfis de junta entre o caixilho e a folha. A Figura 4 mostra representações gráficas do índice de redução sonora, R_w , em bandas de frequência de terceira oitava entre 100 Hz e 5000 Hz, para cada teste realizado.

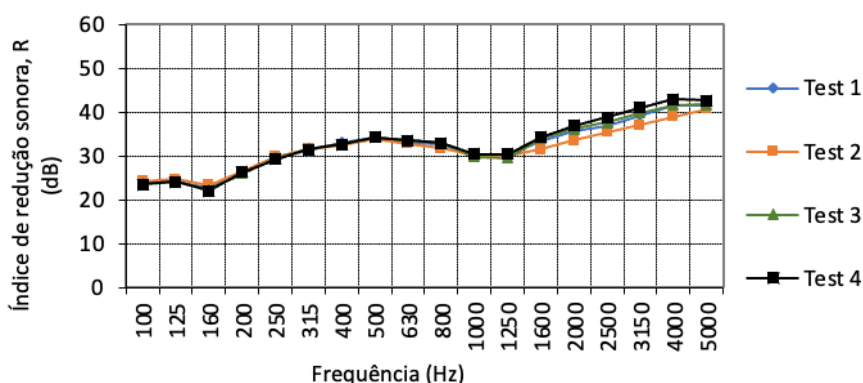


Figura 4: Representação gráfica do índice de redução sonora, R , em bandas de frequência de terceira oitava, entre 100 Hz e 5000 Hz, para cada teste realizado (Testes 1 a 4).

A Tabela 2 apresenta um resumo dos resultados obtidos nos ensaios acústicos realizados em laboratório (Testes 1 a 4).

Tabela 2: Resultados obtidos nos ensaios de determinação do índice de isolamento a sons aéreos.

Frequência [Hz]	Índice de redução sonora, R [dB]			
	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4
R_w (C; C_{tr} ; $C_{100-5000}$; $C_{tr,100-5000}$) [dB]	34 (-1; -3; -1; -3)	33 (-1; -2; 0; -2)	34 (-1; -3; -1; -3)	35 (-2; -4; -1; -4)

A Figura 5 ilustra alguns exemplos de detalhes construtivos das configurações testadas.

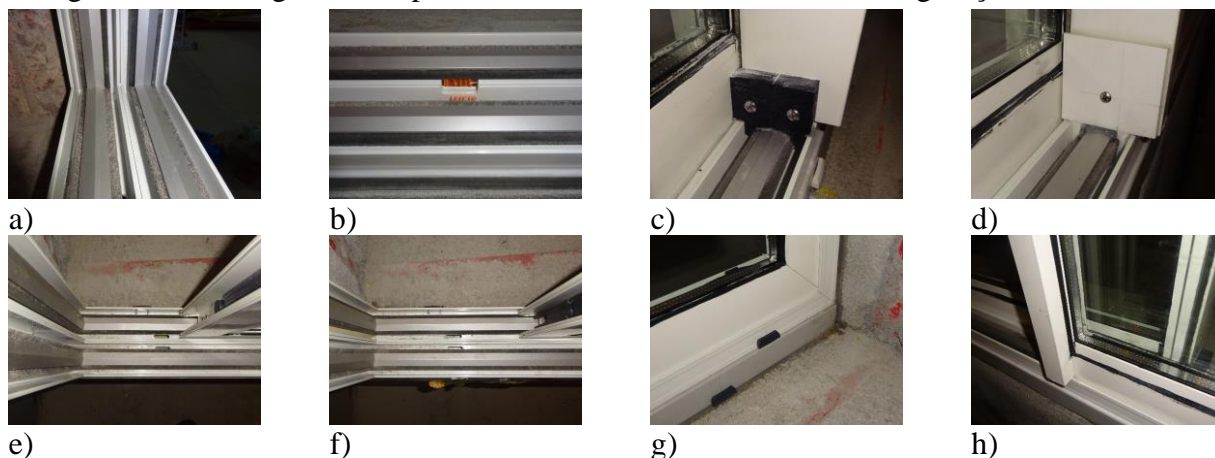


Figura 5: Detalhes construtivos das configurações testadas: a) juntas do caixilho fixo; b) juntas do caixilho fixo (zona central); c) vedação inferior do perfil central da folha móvel; d) vedação inferior do perfil central da folha fixa; e) vedação da zona de encontro do caixilho fixo e da zona de bloqueio da folha móvel; f) reforço da vedação da central na zona de encontro do caixilho fixo e da zona de bloqueio da folha móvel com juntas; g) aspeto visual das ranhuras de drenagem da folha móvel; h) aspeto visual da vedação dos perfis.

A tabela 3 mostra os valores U_f dos perfis de caixilharia em fibra de vidro otimizados (Figura 3) bem como a redução de U_f , em %, quando comparada com os perfis iniciais (sem um material isolante a encher as cavidades de ar).

Tabela 3: Transmissão térmica dos perfis em fibra de vidro otimizados utilizados na janela de correr minimalista.

Perfil	U_f [W/(m ² .°C)]	Redução do U_f [%]
Central	4.986	0.20
Lateral esquerdo	0.941	33.6
Lateral direito	0.908	36.3
Superior esquerdo	0.911	49.0
Superior direito	0.892	49.1

Os resultados mostram que os valores U_f dos perfis de fibra de vidro são significativamente inferiores aos das soluções de janelas minimalistas atualmente disponíveis no mercado que, em média, apresentam valores U_f de 3,5 W/(m².°C) para os perfis laterais e 14 - 25 W/(m².°C) para o perfil central.

Os resultados mostram também que os perfis de fibra de vidro podem ser otimizados enchendo as caixas-de-ar com um material isolante. Esta medida permite uma redução do valor U_f em até 49%.

Conclusões

Neste trabalho de investigação foi realizado um conjunto de ensaios laboratoriais com o objetivo de avaliar a viabilidade do uso de perfis de vidro em janelas de correr tendo por base a garantia de um comportamento satisfatório. Foi determinado o isolamento sonoro a sons aéreos, o desempenho em termos de permeabilidade ao ar, estanquidade à água e resistência ao vento. Estes testes preliminares foram realizados sobre uma geometria semelhante à utilizada nas janelas convencionais. Como este tipo de material e perfis demonstram ser promissores, a segunda fase do trabalho consistiu em desenvolver e otimizar uma geometria do perfil para uma janela de correr minimalista com base no seu desempenho térmico. Os valores de transmissão térmica, U_f , dos perfis otimizados foram determinados e apresentados no trabalho. Os resultados mostram que os perfis de fibra de vidro podem ser uma alternativa aos perfis de alumínio, não só para janelas convencionais, mas também para janelas de correr minimalistas.

Acknowledgements

Esta investigação foi suportada pelo projeto EvoSlide, com o título “Evolution in Window Sliding System” (POCI-01-0247-FEDER-033658) financiado pelo Compete 2020 e pelo FEDER.

Referências

- [1] D. Appelfeld, C.S. Hansen, S. Svendsen, *Development of a slim window frame made of glass fibre reinforced polyester*, Energy and Buildings 42 (2020) 1918-1925.
- [2] A. Gustavsen, B.P. Jelle, D. Arasteh, C. Kohler, *State-of-the-Art Highly Insulating Window Frames. Research and Market Review*, SINTEF Building and Infrastructure, Project report 6 (2007).
- [3] N. Simões, J. Prata, S. Martins, A. Tadeu, *Thermal Performance of Windows: Experimental Validation of Numerical Results*, 39th IAHS (International Association for Housing Science) World Congress, 17 to 20 de September, Milan, Italy (2013).
- [4] ISO 10077-1, Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 1: General (2017).
- [5] ISO 10077-2, Thermal performance of windows, doors and shutters - Calculation of thermal transmittance - Part 2: Numerical method for frames (2017).
- [6] ISO 8990, Thermal insulation - Determination of steady-state thermal transmission properties - Calibrated and guarded hot box (1994).
- [7] ISO 12567-1, Thermal performance of windows and doors - Determination of thermal transmittance by hot box method - Part 1: Complete windows and doors (2010).
- [8] A. Tadeu, I. Simões, N. Simões, J. Prata, *Simulation of dynamic linear thermal bridges using a boundary element method model in the frequency domain*, Energy and Buildings, 43(12) (2011) 3685–3695.
- [9] B.P. Jelle, A. Hynd, A. Gustavsen, D. Arasteh, H. Goudey and R. Hart, *Fenestration of today and tomorrow: A state-of-the-art review and future research opportunities*, Solar Energy Materials & Solar Cells, 96 (2012) 1-28.
- [10] DGS Group: www.dgsgroup.co.uk/catalogues/spacer/.
- [11] B. Moshfegh, D. Loyd and B. Karlsson, *Heat transfer at modern windows - risk of condensation*, Energy and Buildings, 13 (1989) 119-125.
- [12] J. Kim, T. Kim, S. Leigh, *Double window system with ventilation slits to prevent window surface condensation in residential buildings*, Energy and Buildings, 43 (2011) 3120-3130.
- [13] ISO 13788, Hygrothermal performance of building components and building elements - Internal surface temperature to avoid critical surface humidity and interstitial condensation - Calculation methods (2001).
- [14] M. Löffler and D. Buck, *Glazing Edge-Seal using Foamglass as Spacer and Frameless window design*, Solar Energy, 61(5) (1997) 303-312.
- [15] S. Saadatian, N. Simões, F. Freire, *Integrated environmental, energy and cost life-cycle analysis of windows: Optimal selection of components*, Build. Environ., 188 (2021).
- [16] N. Van Den Bossche, A. Janssens, *Airtightness and watertightness of window frames: Comparison of performance and requirements*, Building and Environment, 110 (2016) 129-139.
- [17] M. Sherman, R. Chan, *Building Airtightness: Research and Practice*. Lawrence Berkeley

National Laboratory Report No. LBNL-53356 (2004).

- [18] P.O. Fanger, A.K. Melikov, H. Hanzawa, J. Ring, *Air turbulence and sensation of draught*, Energy Build., 12 (1) (1988) 21-39.
- [19] V. Iordache, T. Catalina, *Acoustic approach for building air permeability estimation*, Building and Environment, 57 (2012) 18-27.
- [20] J. Straube, E. Burnett, *Rain control and design strategies*, J. Therm. Envelope Build. Sci. Vol. 23 (1999) 41-56.
- [21] EN 12211 - Windows and doors - Resistance to wind load - Test method (2016).
- [22] RDH, *Water Penetration Resistance of Windows e Study of Manufacturing, Building Design, Installation and Maintenance Factors*, RDH Building Engineering Limited, Vancouver (2002).
- [23] EN 1026, Windows and doors - Air Permeability - Test method (2016).
- [24] EN 1027, Windows and doors - Watertightness - Test method (2016).
- [25] ISO 10211, *Thermal bridges in building construction – Heat flows and surface temperatures – Detailed calculations* (2017).

Situação e potencial das alvenarias em Portugal perante o contexto internacional

MARQUES Rui^{1, a}

¹ ISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Campus de Azurém,
4800-058 Guimarães, Portugal

^amarquesmnc@sapo.pt

Palavras-chave: Alvenaria estrutural, Tendências, Requisitos, Inovação, Normativa.

Resumo. Os edifícios de alvenaria representam metade do parque habitacional português, mas a sua importância relativa para os aspetos sociais é certamente maior. Apesar do passado de construção nacional com alvenaria estrutural e da forte tradição de setores relacionados, particularmente a indústria cerâmica, a técnica está praticamente em desuso. Esta tendência é contrária ao desenvolvimento de soluções e à preponderância de construção com alvenaria em outros países europeus, ainda que em contextos diferentes, e igualmente noutros continentes. Este trabalho indaga inicialmente sobre as razões para o declínio das alvenarias em Portugal, face aos requisitos de segurança, funcionalidade e sustentabilidade dos edifícios. São depois discutidas as possibilidades de reuso das alvenarias, especialmente no contexto da Indústria 4.0, pois que esta solução tem grande potencial para introduzir conceitos inovadores no setor da construção. As hipóteses de construção com alvenaria são igualmente discutidas face aos desenvolvimentos da normativa para projeto de estruturas de alvenaria.

Introdução

O setor da construção tem sido, nos últimos anos, confrontado com um grande número de novos conceitos a aplicar nas diferentes fases de edificação, desde o projeto até à gestão da construção. Muitas das inovações introduzidas estão relacionadas com o surgimento de altas tecnologias que visam transportar o processo de construção para uma era digital, nomeadamente no contexto da Indústria 4.0. As novas tecnologias são certamente uma mais-valia no setor, mas a sua aplicação necessita de um melhor enquadramento e de uma maior articulação com os processos tradicionais.

Em contrapartida, os materiais e sistemas de construção têm sido desenvolvidos a um ritmo muito mais lento comparativamente às tecnologias digitais, ainda que estudos de novas soluções para potencial industrialização tenham sido realizados. Este é o caso das alvenarias, as quais, em Portugal, são essencialmente usadas como material de preenchimento sem função estrutural. Isto é em contraciclo com o desenvolvimento nos países da Europa Central, e mesmo no mundo em geral, onde se reconhece a importância das alvenarias para uma construção sustentável. Nestes países têm sido desenvolvidos inúmeros sistemas para alvenaria estrutural, adaptados às especificidades locais de cada região, nomeadamente em termos da qualidade possível dos materiais, dos requisitos quer funcionais quer estruturais das paredes de alvenaria, assim como dos aspetos económicos.

O caso de Portugal é enigmático relativamente ao uso das alvenarias. No que respeita à cerâmica, o país é, de acordo com a APICER [1], referência internacional de inovação e desenvolvimento na cerâmica de revestimento, na utilitária e decorativa, na louça sanitária e na cerâmica estrutural de telhas, sem menção às alvenarias. Por outro lado, os blocos de betão têm assumido uma maior preponderância como solução para as alvenarias na construção nacional, tendo em conta aspetos relacionados com a otimização de materiais e com fatores de produção e energéticos. Outro caso enigmático é o uso nacional de alvenaria de pedra, uma vez que Portugal é um dos países com maior património edificado neste material, mas onde a mesma é atualmente usada sobretudo como material de revestimento. Paralelamente a isto, observou-se também uma grande degradação nos processos construtivos das alvenarias. Tudo isto requer, no mínimo, um processo de reflexão.

Alvenaria estrutural

As estruturas de alvenaria representam metade do parque edificado em Portugal. No entanto, o seu uso em construção nova é praticamente inexistente. Para isto contribuem o limitado conhecimento dos projetistas sobre o comportamento estrutural das alvenarias, a escassez de materiais e sistemas de qualidade no mercado nacional, e o aparente pouco interesse do setor da construção na solução.

Em países com fortes economias, como Alemanha e Brasil, verificou-se grande desenvolvimento de produtos para alvenaria (unidades, argamassas, e materiais e acessórios complementares), assim como de tecnologias para a sua execução. As unidades são produzidas com elevada precisão dimensional e excelente acabamento. Estas podem ser feitas com distintos materiais (cerâmica, argila expandida, betão leve, betão celular autoclavado, etc.), formas e tipos de encaixe. As mesmas podem incorporar soluções de isolamento, bem como apresentar orifícios e encaixes para facilitar a montagem e eventual colocação de armaduras. Para as argamassas, são comuns os sistemas baseados em juntas delgadas de argamassa-cola. Estas soluções são exemplificadas na Figura 1.



Figura 1: Exemplos de soluções inovadoras para alvenaria estrutural

A tendência atual é disponibilizar sistemas integrados de alvenaria, com peças complementares (meios-blocos, blocos de remate, etc.; e.g., Figura 2a), de modo a que a construção seja o mais racionalizada possível, minimizando desperdícios e tempos de montagem [2]. Existem igualmente unidades de alvenaria ecológicas, as quais são produzidas a partir de resíduos de cortiça, gesso, fibras de pneus, etc. No que respeita a produtos complementares, existe uma grande gama de soluções, por exemplo, para execução de paredes falsas para isolamento e ventilação, e de caixas de estores e instalações técnicas. Existem também sistemas para montagem integrada das paredes com outros elementos, como os pavimentos e as coberturas, e.g. Figura 2b, assim como acessórios para execução de lintéis, etc. Para o reforço da alvenaria, existem soluções prefabricadas para armação e integração das paredes com outros elementos estruturais, por exemplo, pilares e lajes.

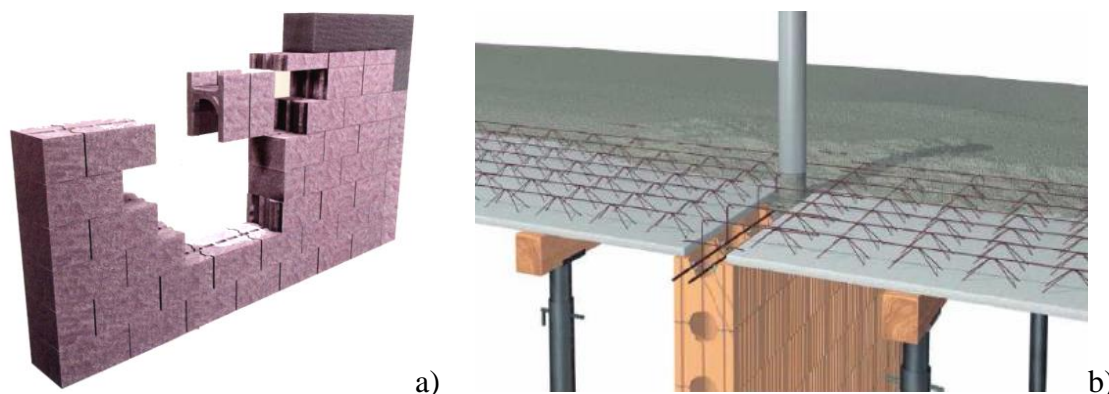


Figura 2: Sistemas industrializados de alvenaria estrutural: a) em blocos de betão e b) com integração de laje

O uso dos sistemas modernos de alvenaria permite aumentar enormemente o arrojo arquitetónico e a beleza dos edifícios, com vãos mais excêntricos e maiores, e com formas complexas e curvas, como observado na Figura 3. Outros aspetos das alvenarias ainda mais evidenciados na construção moderna são a sua solidez, resistência ao fogo, durabilidade, e particularmente a sua funcionalidade. O uso destes sistemas implica, como para outros materiais, um nível adequado de especialização, quer na fase de projeto, com métodos de cálculo apropriados, quer na fase de construção, com a potencial integração de novas tecnologias.

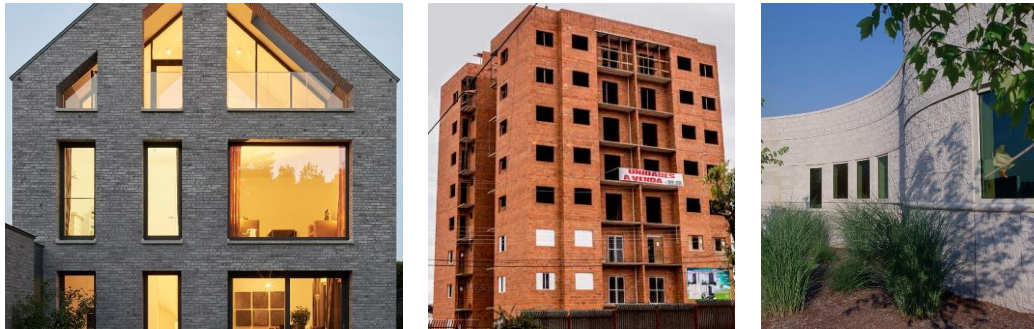


Figura 3: Exemplos de edifícios arrojados em alvenaria estrutural

Tendências de projeto e construção

O projeto de estruturas tem sido feito desde há séculos, ainda que regras integradoras das diferentes solicitações a considerar tenham apenas recentemente sido desenvolvidas e aplicadas. Atualmente, as maiores exigências estruturais e funcionais dos edifícios tornam a concepção de estruturas de alvenaria ainda mais desafiante. O projeto destas estruturas não se limita ao dimensionamento das secções e à disposição das paredes, mas também ao planeamento do processo construtivo, de modo a ter soluções otimizadas com base no conceito de “sistemas construtivos de alvenaria”. Tais sistemas permitiram o reaparecimento no setor de edifícios verdadeiramente em alvenaria.

Os sistemas referidos focam na racionalização do processo construtivo, particularmente pela idealização de soluções construtivas integradas em alvenaria [3]. No caso da alvenaria estrutural moderna, a elevada qualidade geométrica das unidades e o uso de sistemas modulares permitem um planeamento sincronizado da estrutura e das instalações técnicas (rede elétrica, canalizações, etc.). O desenho estrutural consiste principalmente na otimização do arranjo dos blocos (e.g., Figura 4) em conjugação com as instalações técnicas, de modo a permitir elevados rendimentos e reduzido desperdício de material. As ações sísmicas colocam certamente restrição ao projeto de estruturas de alvenaria, mas soluções sismo-resistentes têm igualmente sido desenvolvidas, e.g. [4].

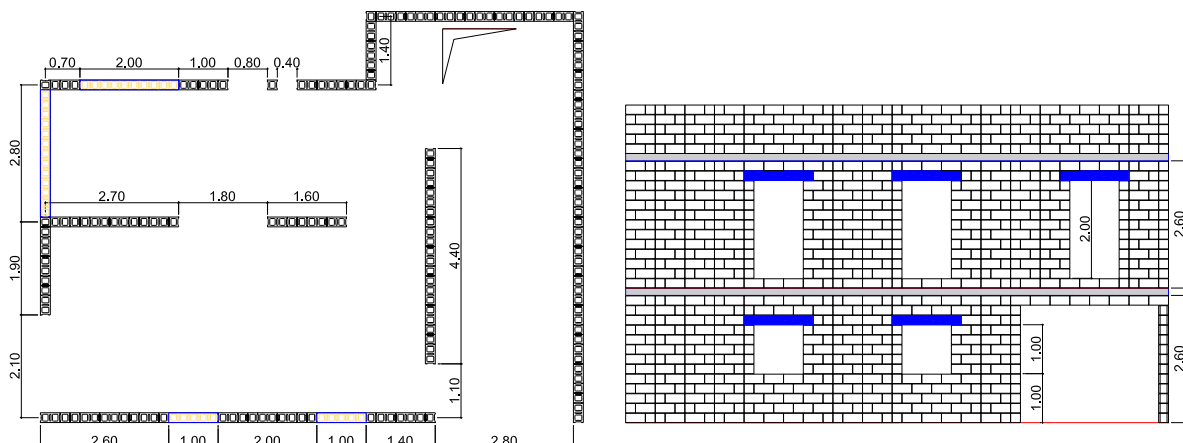


Figura 4: Modulação de um sistema de alvenaria com blocos de betão

O uso de paredes de alvenaria com função de preenchimento em estruturas de betão armado revelou-se uma tendência negativa, uma vez que levou à degradação dos processos construtivos das alvenarias. Os casos de parede de preenchimento em construção reticulada e de estrutura resistente em alvenaria simples são ilustrados na Figura 5. Estudos realizados evidenciam a vantagem de usar alvenaria estrutural face a estruturas reticuladas, para edifícios de pequena a média altura, e.g. [5]. De modo a garantir as exigências térmicas, a solução que emprega tijolo vazado tradicional obriga à construção de dois panos de alvenaria, ao preenchimento parcial da caixa-de-ar com isolamento térmico e à resolução das pontes térmicas. Por outro lado, a solução em alvenaria simples com uso de tijolos estruturais e de elevada eficiência térmica obriga apenas à simples montagem da parede, usualmente com blocos de encaixe que aumentam a produtividade, evitando pontes térmicas. Outros requisitos funcionais relativamente aos edifícios de alvenaria serão discutidos na secção seguinte.



Figura 5: Soluções de paredes de a) preenchimento e de b) alvenaria estrutural. Para quê paredes de preenchimento quando podemos ter paredes resistentes?

As novas tendências arquitetônicas, quer estéticas (e.g., corpos excêntricos e formas curvas; ver Figura 6) quer funcionais (e.g., iluminação e espaços adaptáveis) representam grandes desafios para a indústria da construção e para os projetistas estruturais. Estas implicam uma evolução paralela dos métodos de cálculo e dos processos construtivos para as estruturas. A falta no contexto nacional de documentação técnica e normas que suportem o projeto de alvenaria estrutural é um dos aspetos limitadores do seu uso. O enquadramento das estruturas de alvenaria na regulamentação europeia é na realidade um problema global, mas nem por isso restritivo da sua aplicação na Europa. Na recente revisão dos Eurocódigos, a norma para projeto de alvenaria foi ajustada para permitir uma aplicação mais sustentada da solução, num compromisso entre a complexidade de resultados de investigação, o pragmatismo da experiência e as aptidões dos projetistas.

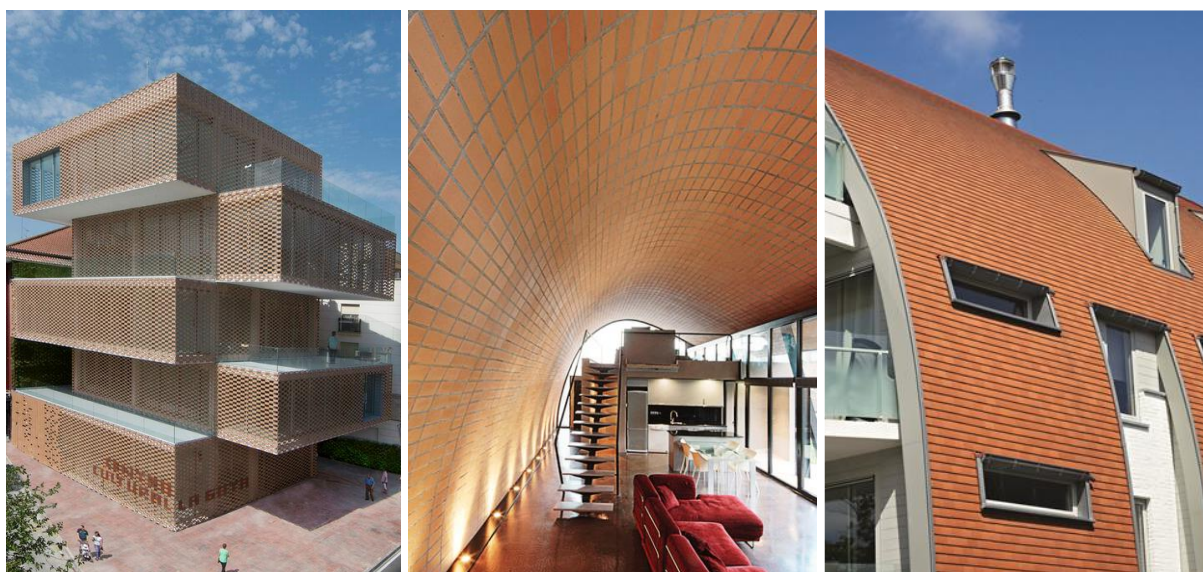


Figura 6: Exemplos de construções arrojadas em alvenaria estrutural

Requisitos dos edifícios

A arquitetura atual abrange um vasto conjunto de materiais para a construção de edifícios, embora haja uma certa prevalência de determinados materiais devido a práticas e fatores locais, seja por razões estéticas, culturais, comerciais, econômicas, energéticas, relacionadas a riscos geográficos, industriais e espaciais. Madeira, aço, betão e alvenaria são geralmente as opções mais comuns para os materiais estruturais dos edifícios. Diferentes opções podem ser consideradas, mas o uso dos diferentes materiais deve, em qualquer caso, ser ponderado face aos requisitos básicos exigidos [6]. A integração dos valores de satisfação destes requisitos pode ser tomada como uma medida da sustentabilidade da solução, tendo em consideração a otimização das necessidades das pessoas e da sociedade durante o ciclo de vida dos edifícios. Os requisitos estruturais e funcionais a considerar para a solução construtiva de um edifício são a seguir enumerados (cada requisito é rotulado com uma abreviação), e brevemente discutidos com referências ao caso da alvenaria.

1. Resistência e estabilidade (REST): A alvenaria possui uma resistência relativamente limitada, sobretudo a esforços de tração, que deve ser tida em conta no projeto. O carregamento excêntrico, muito comum em estruturas modernas, pode também causar uma redução considerável da capacidade de carga das paredes.

2. Durabilidade (DURA): As estruturas de alvenaria apresentam em geral excelente durabilidade comparativamente a outros materiais. As principais patologias estão relacionadas com outros materiais que complementam a solução construtiva, por exemplo o aço de armaduras ou a madeira em carpintarias.

3. Economia (ECON): Os materiais de alvenaria, não sendo os mais baratos, resultam em construções relativamente económicas, nomeadamente em comparação com as estruturas reticuladas, nas quais a quantidade de aço onera os custos, e com as estruturas de madeira no que respeita aos custos de manutenção.

4. Conforto, iluminação e ventilação (COIV): Os edifícios de alvenaria são genuinamente confortáveis aos diferentes sentidos humanos, particularmente em termos visuais e de conforto higrotérmico. Nas construções modernas, as possibilidades de iluminação natural e de ventilação foram muito melhoradas.

5. Resistência ao fogo (REFO): A ação do fogo é especialmente demandante para qualquer construção. A alvenaria é possivelmente o material com melhor resistência ao fogo. Ainda assim, as estruturas de alvenaria devem ser projetadas de modo a que preservem a sua função de suporte de carga durante a exposição ao fogo.

6. Isolamento sonoro (ISOS): Os edifícios de alvenaria apresentam reduzido ruído estrutural. A capacidade de isolamento acústico foi igualmente potenciada pelo desenvolvimento dos sistemas modernos de alvenaria. A tendência de materiais mais leves foi de certa forma contrabalançada pela integração de forros acústicos.

7. Resistência ao tempo e à humidade (RETH): A exposição ao tempo é um fator condicionante da durabilidade das construções. As alvenarias podem ser bastante afetadas pelos fenómenos de absorção de água e humidade ascensional, em termos de resistência e patologias associadas, tais como eflorescências e dano nos revestimentos.

8. Isolamento térmico (ISOT): O desempenho térmico das alvenarias está muito dependente dos materiais e soluções construtivas. Os sistemas modernos de alvenaria, com incorporação de isolamento, permitem fazer face a gradientes térmicos elevados, proporcionando ambientes otimizados no balanço de temperaturas.

9. Estética e arrojo arquitetónico (ESAA): O desenho da alvenaria estrutural tem sido bastante limitado pela conveniência de regularidade face às ações sísmicas. Este talvez seja o maior desafio, mas os sistemas modernos permitem já o projeto de edifícios com corpos excêntricos e formas curvas, conforme já ilustrado atrás.

10. Requisitos ecológicos (RECO): O eco desempenho resulta da integração de fatores relacionados à circularidade de materiais, energética, económica, etc. Há soluções de alvenaria em que a ecologia foi mote para a solução, mas os sistemas modernos de alvenaria são evidenciados como soluções sustentáveis, e.g. [7].

De modo a ter uma ideia global do desempenho dos materiais mais comuns relativamente aos requisitos enumerados, é apresentada, na Tabela 1, uma classificação (definida a critério do autor) em que se pontua cada material de acordo com a ordem em que o mesmo é classificado em cada rubrica. É depois calculado o desempenho global, somando as pontuações para os vários requisitos. A diferença de classificação global entre os diferentes materiais não é significativa, o que reforça a importância do desenvolvimento e competitividade na concepção de uma solução construtiva.

Tabela 1: Classificação de materiais de construção relativamente aos requisitos para os edifícios

	REST	DURA	ECON	COIV	REFO	ISOS	RETH	ISOT	ESAA	RECO	Global
Madeira	2	2	5	5	3	5	2	5	3	5	37
Aço	5	4	2	4	2	2	5	2	4	3	33
Betão	4	3	3	3	4	4	3	3	5	2	34
Alvenaria	3	5	4	2	5	3	4	4	2	4	36

Classificação: 5 = Excelente, 4 = Muito bom, 3 = Bom, 2 = Razoável.

Inovação na construção

O termo “inovação” refere-se a uma descoberta, mas só o será verdadeiramente se tiver utilidade. No setor da construção, diferentes conceitos de inovação têm sido introduzidos nos últimos anos, particularmente no contexto da Indústria 4.0. O setor das alvenarias pode assumir, a este propósito, um papel relevante no sentido de introduzir procedimentos inovadores na indústria da construção. As principais tendências de inovação com aplicação às alvenarias são [2]:

1. Biomimética: projeto e construção com base nas estruturas biológicas da natureza.
2. Tecnologias digitais: uso de soluções como robôs, sensores e inteligência artificial.
3. Construção verde: projeto e construção com soluções sustentáveis e amigas do ambiente.
4. Construção modular e prefabricada: fabricação de sistemas prontos a ser montados em obra.
5. *Building Information Modelling* (BIM): criação e gestão de informação para os processos de construção.

A Indústria 4.0 engloba a automação e a tecnologia da informação, assim como as principais inovações tecnológicas nestes campos. No entanto, o seu verdadeiro foco é a melhoria da eficiência e da produtividade nos processos da indústria. Os intervenientes nos processos de concepção dos edifícios podem tirar partido das referidas tendências de inovação para transportar o seu projeto e a sua construção para uma era digital. Exemplos disso são o desenvolvimento de formas inspiradas na natureza, assim como de sistemas modulares e prefabricados, e numa nova dimensão, o uso de robôs e soluções BIM, respetivamente nos processos de construção e de gestão da informação (Figura 7); ver [8].

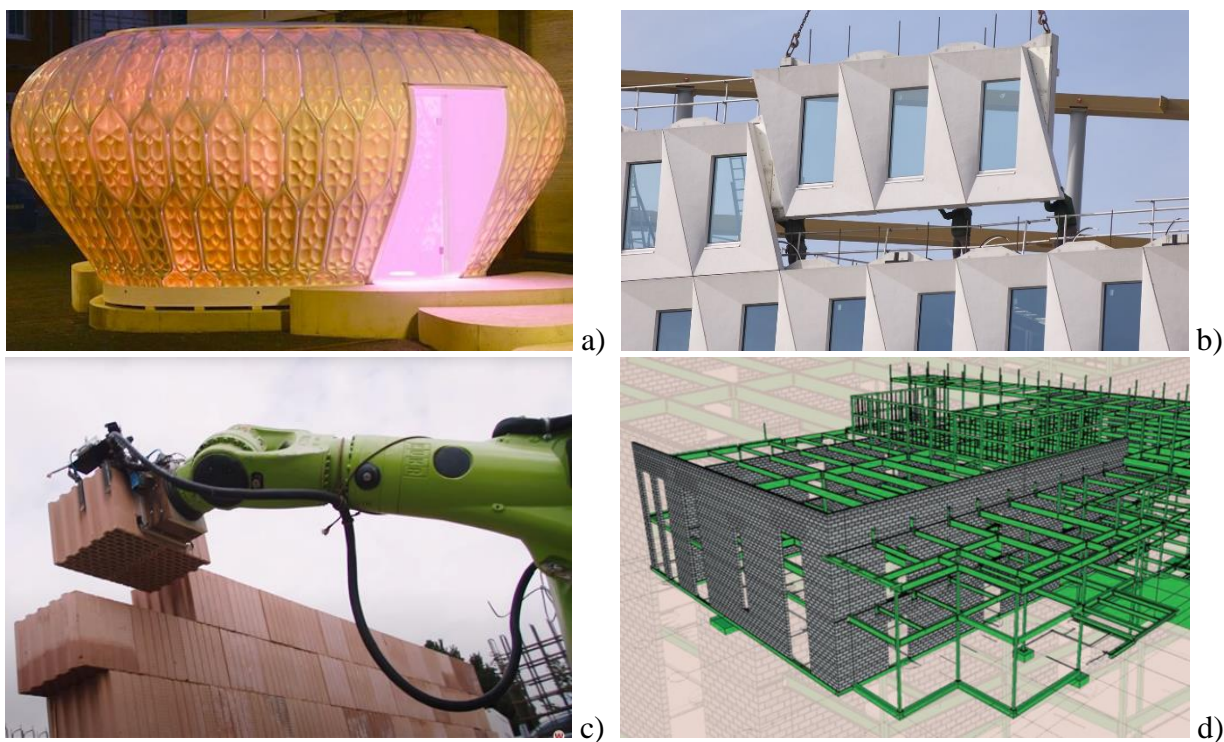


Figura 7: Tendências inovadoras na construção com alvenaria: a) bio inspiração, b) prefabricação, c) robótica e d) BIM

Na corrente de novas tendências e tecnologias, muito diversificados produtos e soluções para construção com alvenaria têm sido desenvolvidos, para atender aos aspetos estruturais de resistência (e.g., face a ações de sismos e furacões) e aos requisitos funcionais (e.g., de eficiência energética e térmica). Na procura de satisfazer estes requisitos, assim com os outros referidos anteriormente, alguns desafios já foram vencidos, tais como a possibilidade de construir edifícios relativamente altos, estruturas de alvenaria com grandes vãos, e edifícios com formas complexas (Figura 8). A sustentabilidade de aplicação das novas tecnologias requer, no entanto, um melhor enquadramento e articulação das mesmas com os processos tradicionais de construção, uma vez que dificilmente todo o processo de concepção poderá ser realizado com altas tecnologias. A evolução terá de ser gradual e progressivamente abrangente.

O projeto de estruturas de alvenaria é regulado na generalidade pela Parte 1-1 do Eurocódigo 6 (NP EN 1996-1-1:2005) [10], cuja correspondente versão europeia foi recentemente revista, de acordo com a estrutura apresentada na Figura 10; ver [11]. Procurou-se obter uma norma mais bem articulada e harmonizada relativamente a aspetos gerais dos ECs, mas igualmente em relação a tópicos específicos do projeto com alvenaria. Aspetos relevantes que foram abordados na revisão da norma com vista à integração de novas soluções no projeto foram:

- A formulação da resistência ao corte, com vista a introduzir regras de cálculo que considerem as especificidades de materiais recentemente usados nos edifícios de alvenaria, por exemplo, membranas de impermeabilização e argamassa-cola em juntas.
- A estabilidade fora do plano, para a qual os procedimentos para consideração dos efeitos de 2ª ordem, particularmente presentes em construções modernas devido às condições de esbelteza e excentricidade [12], foram revistos relativamente ao fator de redução da capacidade (Figura 11).
- A adição de regras para alvenaria confinada, solução que é semelhante ao sistema de estruturas reticuladas, e por isso apresentando potencial de aplicação. A tipologia de alvenaria confinada foi profundamente revista na norma, onde se destacam novas regras de cálculo ao corte e à flexão [13].

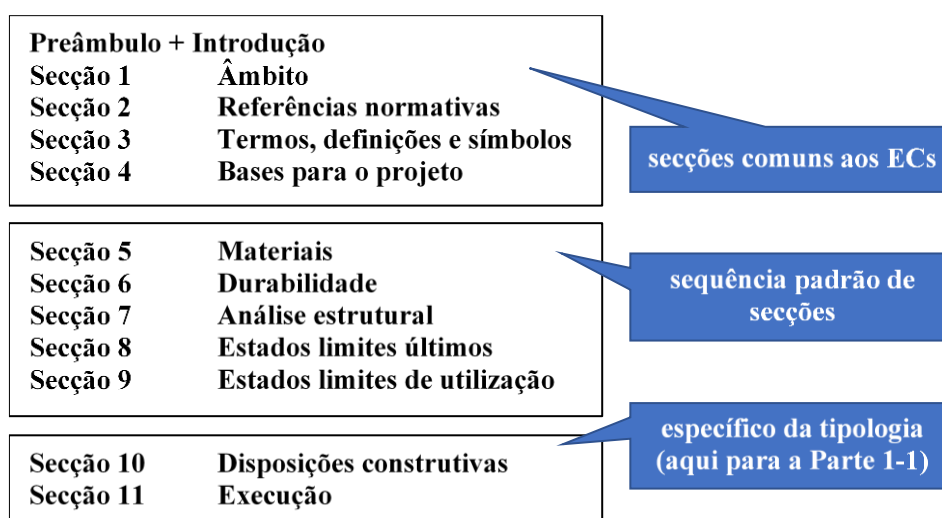


Figura 10: Estrutura da versão revista da Parte 1-1 do Eurocódigo 6 (prEN 1996-1-1)

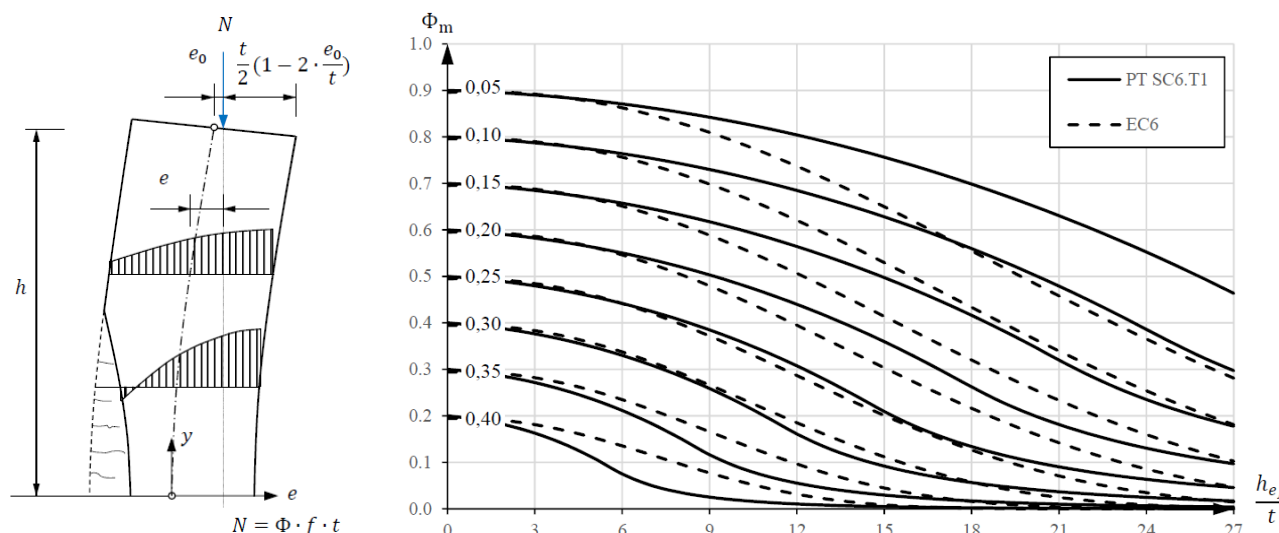


Figura 11: Cálculo do fator de redução da capacidade devido aos efeitos de 2ª ordem (PT SC6.T1 corresponde à nova proposta) [11]

No Eurocódigo 6, o procedimento de projeto é baseado essencialmente num cálculo aos estados limites, para verificar que um efeito aplicado a um elemento é inferior à sua resistência. O trabalho de revisão da norma permitiu, no entanto, abrir horizontes com vista à incorporação de procedimentos de cálculo baseados no desempenho, particularmente em articulação com a norma de projeto sísmico, o Eurocódigo 8 (NP EN 1998-1:2010) [14].

Notas finais

Os sistemas de alvenaria moderna são uma solução potencialmente vantajosa e comprovadamente sustentável para a edificação. A solução permite tendências modernas e obedece a requisitos atuais para a construção. As ações sísmicas não são, em geral, demasiado limitadoras da solução. As alvenarias têm também grande potencial para a introdução de conceitos de inovação no setor.

Um enorme trabalho tem sido realizado internacionalmente em investigação, desenvolvimento de soluções construtivas, normas e tecnologias para implementação da alvenaria estrutural. No contexto nacional, o emprego da alvenaria como uma solução estrutural necessita ser reconsiderado, o que será apenas possível com a sensibilização de todas as partes interessadas.

Referências

- [1] APICER, *Cerâmica Portuguesa: tradição e inovação*, Associação Portuguesa das Indústrias de Cerâmica e Cristalaria, Coimbra (2016).
- [2] R. Marques, P.B. Lourenço, *Inovação e projeto de alvenaria estrutural segundo o Eurocódigo 6*, *Construção Magazine*, 101 (2021) 16–19.
- [3] G.A. Parsekian, A.A. Hamid, R.G. Drysdale, *Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural*, EdUFSCar – Editora da Universidade Federal de São Carlos, SP, Brasil (2012).
- [4] R. Marques, *Metodologias inovadoras no cálculo sísmico de estruturas em alvenaria simples e confinada*, Tese de doutoramento, Universidade do Minho, Guimarães (2013).
- [5] R. Marques, P. Torre, P.B. Lourenço, *Construir com alvenaria estrutural: vencer a crise com construção mais eficiente*, *INFO - Ordem dos Engenheiros Região Norte*, 27 (2012) 62–64.
- [6] A.E.D. El-Alfy, *Design of sustainable buildings through Value Engineering*, *Journal of Building Appraisal*, 6 (2010) 69–79.
- [7] I. El-Adaway, T. Breakah, S. Khedr, *Brick masonry and sustainable construction*, in *ICSDC 2011: Integrating Sustainability Practices in the Construction Industry*, pp. 524–534 (2012).
- [8] P. Roberts, *Innovation in Masonry Today*, Keynote in the 13th North American Masonry Conf., Salt Lake City, Utah (2019), <https://masonrysociety.org/wp-content/uploads/2019/06/Keynote-Address-by-Peter-Roberts-Tuesday-Morning.pdf>, acessado em 25/10/2022.
- [9] MOPTVDU, *Manual técnico: Sistema constructivo bloque panel*, Ministerio de Obras Públicas, Transporte y de Vivienda y Desarrollo Urbano, Proyecto TAISHIN Fase II, San Salvador, El Salvador (2010).
- [10] IPQ, *Eurocódigo 6 – Projeto de estruturas de alvenaria - Parte 1-1: Regras gerais para estruturas de alvenaria armada e não armada*, NP EN 1996-1-1:2005. Instituto Português da Qualidade, Caparica (2005).
- [11] P.B. Lourenço, R. Marques, *Design of masonry structures (General rules): Highlights of the new European masonry code*, Keynote in the 17th International Brick/Block Masonry Conference, Kraków, pp. 3–17, CRC Press/Balkema, Leiden (2020).
- [12] T. Bakeer, W. Jäger, *Buckling of reinforced and unreinforced masonry walls - A unified solution for Eurocode 6*, in *Proceed. of the 13th Canadian Masonry Symposium*, Halifax (2017).
- [13] R. Marques, P.B. Lourenço, *Structural behaviour and design rules of confined masonry walls: Review and proposals*, *Construction and Building Materials*, 217 (2019) 137–155.
- [14] IPQ, *Eurocódigo 8 – Projeto de estruturas para resistência aos sismos - Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios*, NP EN 1998-1:2010. CT 115 (LNEC), março de 2010. Instituto Português da Qualidade, Caparica (2010).

Ligações de Madeira Resistentes a Momento

REBOUÇAS Arthur S.^{1,2 a}, BRANCO Jorge M.^{1 b} e LOURENÇO Paulo B.^{1,c}

¹Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia (ISISE), Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

²Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte (IFRN), Campus São Paulo do Potengi, 59460-000, Rio Grande do Norte, Brasil

^aarthur.reboucas@ifrn.edu.br, ^bbranco@civil.uminho.pt, ^cpbl@civil.uminho.pt

Palavras-chave: Estruturas de madeira, Ligações madeira-aço, Ligações resistentes a momento, Dissipação de energia, Ductilidade.

Resumo. Nas estruturas porticadas de madeira (*heavy timber structures*), as ligações dúcteis e resistentes a momentos têm um papel crucial, pois a possibilidade de dissipação de energia é limitada pela pequena quantidade de ligações. De acordo com o Eurocódigo 8, no caso de edifícios de madeira em regiões sísmicas, as zonas de dissipação devem estar localizadas nas ligações, enquanto os demais elementos de madeira devem ter comportamento elástico. Por isso, nos últimos anos têm sido feitas muitas propostas de ligações aço-madeira visando obter uma dissipação de energia mais eficaz através da deformação plástica de ligadores de aço. Neste contexto, o presente trabalho tem o objetivo de analisar e comparar os principais tipos de ligações existentes de forma a identificar possibilidades para o desenvolvimento ligações resistentes a momentos com ductilidade melhorada, rigidez e resistência adequados a aplicação em edifícios. Para efetiva comparação, os modos de avaliação de ductilidade foram sintetizados e foram propostas sugestões de classificação para a rigidez rotacional inicial e a resistência a momento fletores. Os resultados indicaram que as ligações propostas, apesar de apresentarem bons níveis de resistência a momento, ainda não atingiram a rigidez rotacional inicial necessária para utilização em edifícios de madeira sem elementos estruturais que contribuam para rigidez global, como contraventamentos e núcleos rígidos. A maioria das ligações não alcançaram a ductilidade adequada e apresentaram rotura frágil, com excessivo dano nos elementos de madeira, o que leva à necessidade da utilização de uma maior quantidade de ligações para aumentar a dissipação de energia total no edifício em zonas sísmicas. Apenas as ligações com varões colados, com rotura governada por elementos de aço conectados entre a viga e o pilar apresentaram ductilidade adequada. Até o momento, não há uma tendência clara sobre qual tipo de ligação teria uma vantagem absoluta em termos de rigidez, resistência e ductilidade.

Introdução

A demanda por edifícios de madeira tem crescido nos últimos 20 anos devido a diversos fatores. Em vista disso, o desenvolvimento de novas técnicas executivas e a ampliação do conhecimento sobre os novos pormenores de projeto tornam-se relevantes para a construção de edifícios mais altos e estruturalmente seguros. Devido a baixa rigidez da madeira, uma das tarefas mais desafiadoras do projeto é garantir a estabilidade global, para isso, têm sido utilizados dois diferentes tipos de sistema estrutural: com ligações rotuladas e muitos elementos diagonais de contraventamento ou com núcleo rígido central ligado aos principais pórticos resistentes. Entretanto, ambos os casos apresentam interferências relevantes na arquitetura, que podem ser solucionadas com a aplicação de ligações resistentes a momentos fletores.

Diversas ligações desse tipo já foram apresentadas na literatura e algumas até empregadas em edifícios altos, como no norueguês Mjøstårnet [1], mas atualmente a sua baixa rigidez ou a capacidade de dissipação de energia insuficiente são empecilhos quando se pretende ter uma

estrutura porticada com maiores vãos ou sem contraventamentos. Ademais, em vista das inúmeras diferenças entre as ligações propostas, muitas vezes torna-se complicado encontrar maneiras de compará-las ou de perceber possíveis lacunas para posterior evolução de suas características.

Diante disso, torna-se cada vez mais relevante buscar formas de desenvolver ligações de madeira resistentes a momento, mas que tenham maior rigidez e uma ductilidade adequada para zonas sísmicas. Portanto, este trabalho tem o objetivo de analisar e comparar os principais tipos de ligações existentes de forma a identificar possibilidades para o desenvolvimento ligações resistentes a momentos com ductilidade melhorada, rigidez e resistência adequados a aplicação em edifícios.

Ligações de madeira resistentes a momentos fletores

As primeiras ligações de madeira com a capacidade de resistir ao momento foram desenvolvidas durante as décadas de 1970 e 1980 com a aplicação de placas de aço em ambos os lados da madeira e de pregos na transversal para conectar a viga e a coluna [2]. Uma ligação com vários pregos de 6,35mm de diâmetro e placas laterais com espessura de 3,175mm foi testada sob carga monotônica e cíclica e resultou em um momento máximo de 28 kNm e rotação última de 0,028 radianos, aproximadamente [3]. Esse tipo de ligação não é muito atrativo do ponto de vista prático, pois é cara devido a grande quantidade de furos que devem ser feitos na placa e, além disso, tem baixa resistência ao fogo.

No Japão, foram desenvolvidas ligações com cavilhas de aço transversais a madeira lamelada colada e placas de aço inseridas na direção paralela às fibras ao longo de toda seção da viga. As partes da ligação foram fabricadas na indústria e a montagem foi completamente realizada na obra [4]. Esse tipo de ligação resistente a momento ofereceu uma estética melhor em relação aos propostos até aquela época, e com a inserção da placa, a madeira lamelada colada protege o aço e contribui para a melhoria da resistência ao fogo da ligação. Entretanto, sem reforços, as ligações desse tipo apresentavam baixa ductilidade e baixa resistência a momento.

Ligações com cavilhas e placa de aço inserida em madeira lamelada colada. Nas ligações com cavilhas e placa de aço inserida na madeira, o potencial de desempenho associado ao reforço com parafusos auto-perfurantes (STS) fez com que muitas pesquisas fossem realizadas com esse direcionamento. O uso de reforço com STS na direção perpendicular as fibras e de cavilhas em ligações com madeira lamelada foi avaliado por [5]. Em termos de comparação também foram testadas ligações sem reforço e danificadas, todas com as mesmas dimensões, vigas de seção transversal 130mm × 305mm (b × h) e pilares com 272mm × 305mm. Os resultados demonstraram que as ligações reforçadas com STS tiveram um aumento da resistência a momento de 100% sob carga monotônica e de aproximadamente 70% sob carga cíclica, quando comparadas as ligações sem reforço. No seguimento deste trabalho, os estudos foram expandidos por [6] com três diferentes layouts, focando na influência do diâmetro dos chumbadores e entre eles as extremidades dos elementos de madeira na capacidade resistente da ligação. Os resultados obtidos mostraram que a resistência a momento aumentou 22,5% quando o diâmetro dos ligadores cresceu de 19,0 para 25,4mm. Ademais, a redução na distância para extremidade da ligação levou a um aumento da resistência a momento de 35,3%, quando comparada as ligações não reforçadas. Entretanto, sob testes cíclicos identificou-se uma redução da capacidade de rotação em cerca de 50% com o aumento do diâmetro dos ligadores, isso acompanhado de um modo de ruptura frágil, bloco de corte seguido de splitting.

O comportamento rotacional dessas ligações utilizando madeira lamelada cruzada colada foi estudado por [7]. 22 ligações em escala real foram testadas sob carga monotônica e reversa para determinar relações momento-rotação. Concluiu-se que a utilização de madeira lamelada cruzada colada em partes específicas da ligação aumentou a resistência a momento (52% e 46% para monotônica e cíclica, respectivamente), deformabilidade (94%), e dissipação de energia (25%) em relação as ligações sem reforço. Entretanto, as ligações reforçadas com STSs foram ainda mais efetivas em termos de resistência a momento e dissipação de energia.

Com base nos dados coletados e discutidos anteriormente, é possível concluir que as ligações com cavilhas e placa de aço inserida em madeira lamelada colada sem reforço apresentaram roturas frágeis (rotura prematura em geral). Entretanto, quando reforçadas com STS, um comportamento dúctil pode ser constatado sob carga monotônica e cíclica. Para atingir esses resultados satisfatórios, as ligações foram construídas com oito cavilhas com diâmetro de 19 ou 20mm (quatro na viga e quatro no pilar) variando o número de parafusos entre quatro e seis fora cada elemento estrutural, como visualiza-se na Figura 1.

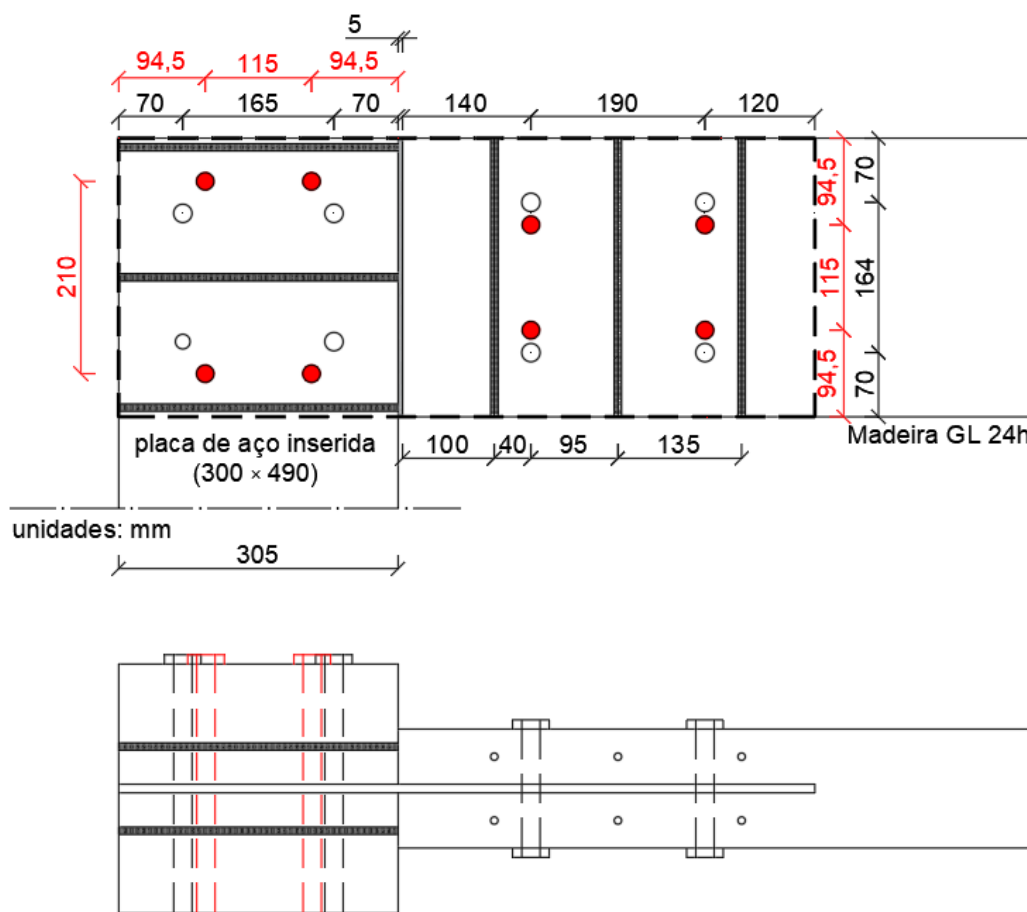


Figura 1: Resumo das principais geometrias utilizadas na ligações dúcteis resistentes a momento com cavilhas e placa de aço inserida em madeira lamelada colada.

Ligações com varões colados em madeira lamelada colada. Nessas ligações varões de aço são colados dentro da madeira, maioritariamente paralelos às fibras, assim é possível obter vantagens estéticas ao manter apenas visível a madeira, protegendo os elementos de aço do fogo e de possíveis ações climáticas.

As ligações resistentes a momento com varões colados podem ser resumidas em três grupos, de acordo com sua geometria e seu comportamento estrutural (Figura 2). As ligações do tipo I, apenas com barras posicionadas paralelamente as fibras, resultaram em modos de rotura frágeis. O melhor desempenho desse tipo de ligação foi alcançado pela geometria I(b), na qual um varão foi inserido na região central da ligação para evitar a fissuração por corte [8]. As ligações do tipo II apresentaram um comportamento dúctil sob carga cíclica e monotônica, uma vez que a rotura ocorreu sempre nos elementos de aço, com poucos danos a madeira. A aplicação de três seções fechadas de aço e de reforço com STS foi benéfica, pois aumentou a resistência a momento da ligação e reduziu a probabilidade de fissuração e fendilhamento próximo aos apoios. Por outro lado, nos casos onde a espessura da alma dos elementos fechados é muito fina, a ligação pode sofrer flambagem lateral entre os enrijecedores centrais, não atingindo altos níveis de ductilidade.

O tipo III foi o que conseguiu atingir o mais alto grau de ductilidade devido a sua capacidade de rotação elevada. O modo de rotura preponderante nas ligações com link de aço foi o alcance do limite elástico do T-stub na região da placa que está em contato com a madeira (*end-plate*), pois foi

projetado para governar o comportamento estrutural da ligação. Além disso, foi possível identificar que quando a espessura *end-plate* aumenta, maior é a resistência a momento da ligação e menor é a sua capacidade de rotação. Na maioria dos trabalhos estudados, os espécimes com maior espessura da *end-plate* apresentaram rotura frágil com fratura dos varões colados. Portanto, constata-se que o aumento da espessura da placa, tornando-a mais rígida, deixa a ligação menos dúctil.

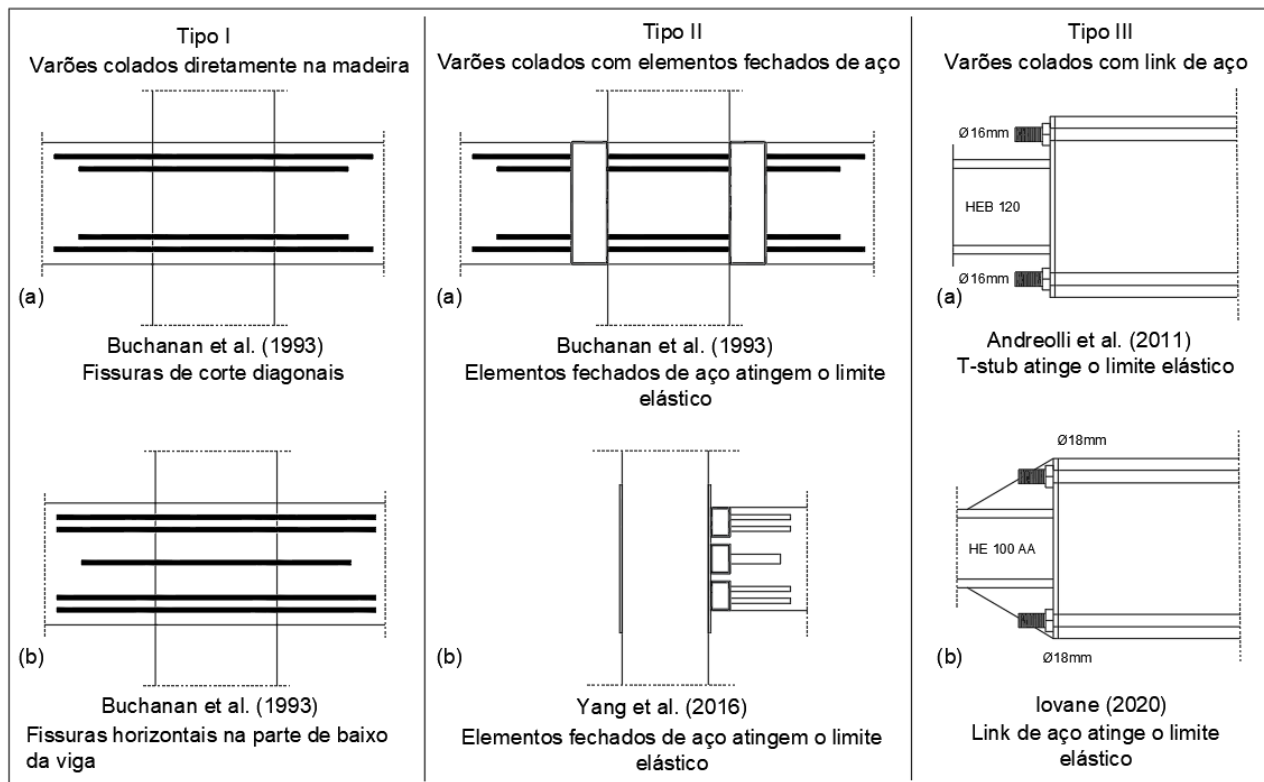


Figura 2: Geometrias e modos de rotura das ligações dúcteis e resistentes a momento com varões colados a madeira.

Avaliação da ductilidade em ligações de madeira

Nas estruturas de madeira, a ductilidade pode ser alcançada mais facilmente através das ligações, os elementos estruturais devem se comportar linearmente (dentro dos limites elásticos) e que todo o comportamento não-linear deve estar concentrado nas ligações. Contudo, a definição de ductilidade ainda é duvidosa para os projetistas, devido a grande quantidade de formulações existentes na literatura e que entregam diferentes resultados. Contudo, definição mais utilizada e consistente, é aquela explicada por [9] como a habilidade de uma estrutura atingir larga amplitude de deformações cíclicas in regime plástico sem uma redução substancial de resistência. Definição também sugerida pela norma Suíça para estruturas de madeira [10], e pela EN 12512 [11].

De acordo com essas normas, a ductilidade pode ser medida por um fator que considera, prioritariamente, a diferença entre a deformação última e a deformação no final do regime elástico (Equação 1). No Eurocódigo 8 (ano) informa-se que este método é adequado para avaliar a ductilidade de ligações ou estruturas com alta deformabilidade, desde que os valores supracitados sejam obtidos a partir de ensaios cíclicos quase estáticos. Embora muitos pesquisadores tenham utilizado essa definição para medir a ductilidade, ela ainda não é universalmente aceita.

$$\mu = \Delta_{Fu} / \Delta_{Fy} \quad (1)$$

Em que F_y é resistência ao final do limite elástico e Δ_{Fy} é o deslocamento correspondente, F_{max} é a resistência máxima e Δ_{Fmax} seu respectivo deslocamento, F_u é a resistência última no ponto de rotura (ou $F_u = 0.8 F_{max}$, o que acontecer primeiro) e Δ_{Fu} é o deslocamento correspondente.

A validade de diferentes proposições de ductilidade foi estudada com base em quatro critérios: (i) Uma ligação não pode ser considerada dúctil se o deslocamento máximo ou a rotação sejam atingidos com perda de resistência; (ii) As definições que são diretamente relacionadas ao cálculo

da dissipação de energia pela área abaixo do gráfico não são práticos o suficiente e devem ser desconsideradas; (iii) As definições devem considerar o comportamento pós-pico poder considerar a habilidade de amplificação dos deslocamentos da ligação; (iv) Deve ser descartada quando os resultados tem grande diferença para variações na rigidez inicial enquanto as curvas de força-deslocamento tem aspeto bem similar e alcançar o mesmo deslocamento final [12]. De acordo com essas premissas, conclui-se que a definição de ductilidade mais adequada para avaliar o comportamento de ligações de madeira é a Equação 2.

$$\mu = (\Delta_{Fu} - \Delta_{Fy})/\Delta_{Fu} \quad (2)$$

O cálculo dos fatores de ductilidade depende do ponto de deformação elástica (*yield point*), que é definido como a carga na qual a ligação começa a deformar plasticamente. Em teoria, esse ponto é detetável a partir de testes monotônicos, entretanto, a maioria das ligações de madeira apresentam um comportamento não-linear e, em alguns casos, o ponto de transição entre o regime elástico e plástico não é claro. Na prática, existem diversas definições disponíveis para determinar o *yield point* que levam a resultados diferentes e os resultados deles podem variar em até 80% [13]. Para as comparações realizadas neste artigo, apenas o método proposto pela EN 12512 foi aplicado.

Um sistema de classificação para ligações de madeira foi proposto por [14], através do qual é possível classificar ligações e componentes em quatro categorias, conforme a Tabela 1. Essa proposta utiliza o mesmo fator de ductilidade da EN 12512 e também foi adotada neste trabalho.

Tabela 1: Classes de ductilidade para ligações e componentes de madeira.

Classificação	Fator de ductilidade
Frágil	$\mu \leq 2$
Ductilidade baixa	$2 < \mu \leq 4$
Ductilidade moderada	$4 < \mu \leq 6$
Ductilidade alta	$\mu > 6$

É importante destacar que o fator de ductilidade pode ser usado para a estrutura toda ou apenas para uma parte dela, como subsistemas ou ligações. De acordo com o Eurocódigo 8, as construções de madeira devem ser atribuídas a uma das três classes de ductilidade presentes na Tabela 2, dependendo do seu comportamento dúctil e da sua capacidade de dissipação de energia sob ações sísmicas. Para cada classe, diferentes valores coeficientes de comportamento (q) são admissíveis. Para serem classificadas com classe M, as zonas de dissipação de energia da estrutura (ligações são zonas de dissipação de energia) devem ter capacidade de deformar plasticamente por pelo menos três ciclos reversos totais em um fator de ductilidade 4. E para serem classificadas como H, as zonas deve ter um fator de ductilidade de pelo menos 6, sem reduzir mais de 20% da sua resistência.

Avaliação experimental da rigidez rotacional inicial

Em ligações de madeira resistentes a momento, a rigidez inicial é um parâmetro muito importante, principalmente se for adotado um sistema estrutural porticado sem contraventamentos. Nesse caso, a rigidez rotacional local das ligações está associada a rigidez global do edifício e é um ponto crucial para cumprir as exigências normativas no estado limite de serviço.

De acordo com [15], em ligações que apresentam uma curva momento-rotação ligeiramente suavizada na horizontal no início do ensaio, a rigidez rotacional inicial pode ser medida a partir de pontos que correspondem a aproximadamente 10% e 40% do ponto de momento máximo. Outros autores, como [16], determinaram a rigidez rotacional inicial a partir de uma linha secante a curva, definida entre 0 e 40% do momento máximo, desconsiderando a parte inicial referente ao ajuste entre os chumbadores e os furos na madeira (Figura 3). Nos demais tipos de ligações, a rigidez inicial pode ser medida do ponto que delimita o final do limite elástico (*yield point*) ao início da curva momento-rotação [17]. Portanto, neste artigo as rigidezes rotacionais iniciais foram medidas de acordo com as duas últimas metodologias citadas, sempre em relação ao zero.

Tabela 2: Classes de ductilidade para estruturas de madeira

Classe de ductilidade	q	Exemplos de estruturas
Baixa capacidade de dissipar energia (DCL)	1,5	Consolas; vigas; arcos com duas ou três ligações rotuladas; asnas com ligações por ligadores em anel, em placa circular ou em placa denteada
Média capacidade de dissipar energia (DCM)	2,0	Painéis de parede colados com diafragmas colados, ligados por pregos e parafusos de porca; asnas com ligações com parafusos de porca e com cavilhas; estruturas mistas constituídas por uma estrutura de madeira (resistente às forças horizontais) e por um enchimento não resistente
	2,5	Pórticos hiperestáticos com ligações com parafusos de porca e com cavilhas
Alta capacidade de dissipar energia (DCH)	3,0	Painéis de parede pregados com diafragmas colados, ligados por pregos e parafusos de porca; asnas com ligações pregadas
	4,0	Pórticos hiperestáticos com ligações com parafusos de porca e com cavilhas
	5,0	Painéis de parede pregados com diafragmas pregados, ligados por pregos e parafusos de porca

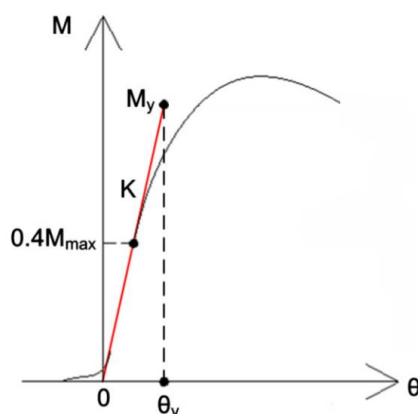


Figura 3: Determinação da rigidez rotacional inicial em ligações de madeira resistentes a momento.

Comparação das ligações resistentes a momento

Devidos as diferenças geométricas e de comportamento estrutural, a comparação direta entre as ligações não é uma tarefa simples. Além disso, em termos práticos de projeto, é insuficiente realizar a avaliação das ligações apenas com base na resistência a momento. Portanto, um conjunto de quatro parâmetros importantes foi considerado neste artigo: resistência a momento; rigidez rotacional inicial; ductilidade e modo de rotura.

As ligações resistentes a momento com placas inseridas na madeira (*bolted slotted-in steel plates*) são as mais utilizadas nas construções recentes, entretanto, quando projetadas sem reforços transversais, tem apresentado baixa resistência a momento e rotura frágil sob cargas cíclicas. Como apresentado na Tabela 3, com a inserção de parafusos auto-perfurantes (*self-tapping screws-STS*) perpendicular as fibras, constatou-se um aumento da rigidez inicial, da resistência a momento e da capacidade de rotação desse tipo de ligação. Mesmo com a aplicação dos STS, na maioria dos casos estudados, os modos de rotura se mantiveram frágeis, mas ocorreram em níveis de deformação plástica elevados.

As ligações resistentes a momento com varões colados (*glued-in rods*) são construídas através da colagem desses varões paralelamente às fibras da madeira e do outro lado presos a elementos de aço como perfis “I” ou seções fechadas. Pretende-se que a rotura dessas ligações seja governada pela resistência do elemento de aço, o que torna o seu modo de rotura dúctil. Embora existam poucas pesquisas realizadas em torno deste tema, a partir dos dados coletados e apresentados na Tabela 4,

foi possível constatar que esse tipo de ligação tem demonstrado uma capacidade de dissipação de energia elevada.

Tabela 3: Comparação dos resultados experimentais para as ligações resistentes a momento com placas inseridas na madeira.

Referência	Seções transversais da coluna e da viga [mm]	Chumbadores e parafusos (STS) [mm]	Espessura da placa de aço [mm]	Initial rotational stiffness [kNm/rad]	My [kNm]	Mmáx [kNm]	fy [°]	fmáx [°]	Modo de rotura
Lam et al. (2008) [5]	304×272 304×130	4 × Ø19,1 Ø8 (l=300)	9,5	1058,8	41,83	62,54	3,00	15,90	**
Lam et al. (2010) [6]	304×272 304×130	4 × Ø25,4 Ø8 (l=300)	9,5	2116,0	84,79	105,90	2,37	6,84	Frágil
Wang et al. (2014) [7]	305×272 305×130	4 × Ø20,0 Ø8 (l=300)	9,5	517,0*	50,50	57,90	6,90	12,40	Frágil
He et al. (2017) [16]	Não 260×130	6 × Ø16,0 Não possui	10,0	771,3	19,80 ***	23,01* **	1,20 ***	2,34** *	Frágil
Wang et al. (2019) [15]	390×350 305×130	4 × Ø20,0 Não possui	9,5	803,3	10,00 ***	20,00* **	4,30 ***	9,50** *	Frágil

*Valores aproximados obtidos a partir de curvas de momento-rotação.

**A rotura não ocorreu, pois o atuador atingiu sua capacidade máxima.

***Resultados para ensaios com carga monotônica.

Tabela 4: Comparação dos resultados experimentais para as ligações resistentes a momento com varões colados.

Referência	Seções transversais da coluna e da viga [mm]	Varões colados [mm]	Elemento de aço	Carga Monotônica			Carga cíclica		Modo de rotura
				Initial rotational stiffness [kNm/rad]	Mmáx [kNm]	φmáx [°]	Mmáx [kNm]	φmáx [°]	
Vašek & Vyhánek (2006)	180×180 280×180	6 × Ø14	não	-	16,00*	0,60*	-	-	Frágil
Tomasi et al. (2008) [19]	Rígida 230×120	4 × Ø16	HEB 120 (S275)	4621,0*	35,66	5,73	-	-	Dúctil
Andreolli et al. (2011) [20]	Rígida 230×120	4 × Ø16	HEB 120 (S275)	4333,0	24,54	8,02	15,00*	5,73*	Dúctil
Yang et al. (2016) [17]	350×151 420×135	4 × Ø20	Fechado (S235)	2187,0	64,10	7,44*	-	-	Dúctil

*Valores aproximados obtidos a partir de curvas de momento-rotação.

Para comparação das ligações foram propostas classificações de rigidez rotacional inicial e de resistência a momento relacionadas a sua respectiva altura. A classificação de rigidez foi definida na Tabela 5 com base no comportamento das ligações estudadas e no conceito de rigidez rotacional relativa, apresentado na Equação 3, como a relação entre a rigidez rotacional inicial e a altura útil da viga ao quadrado.

$$k_{rel} = k_{ini}/z^2 \quad (3)$$

Tabela 5: Classes de rigidez rotacional inicial para ligações de madeira resistentes a momento

Classificação de rigidez rotacional	Rigidez relativa (kNm/rad)/mm ²
Baixa	$k_{rel} \leq 0,01$
Moderada	$0,01 < k_{rel} \leq 0,05$
Alta	$k_{rel} > 0,05$

De acordo com [18], em um edifício de 8 andares, com sistema estrutural porticado, sem contraventamentos transversais, seria necessário obter uma rigidez rotacional inicial entre 10000 e 15000 kNm/rad nas ligações para atender ao estado limite de serviço. Embora as ligações estudadas até o momento não tenham atingido esses valores diretamente, muito por causa das limitações de suas dimensões e dos custos atrelados a realização de ensaios de maior magnitude, existe uma

capacidade potencial de sua utilização com geometria maiores que apresentariam valores proporcionais de rigidez rotacional e resistência a momento, mas que podem trazer outros desafios.

Com relação a resistência a momento, a classificação foi realizada a partir do conceito de resistência relativa (Equação 4), muito similar ao apresentado para a rigidez rotacional. A classificação sugerida está apresentada na Tabela 6.

$$M_{rel} = M/z \quad (4)$$

Tabela 6: Classes de resistência a momento para ligações de madeira

Classificação de resistência a momento	Resistência relativa (kNm/mm)
Baixa	$M_{rel} \leq 0,1$
Moderada	$0,1 < M_{rel} \leq 0,3$
Alta	$M_{rel} > 0,3$

Na Tabela 7 foi apresentado um resumo do comportamento das principais ligações resistentes a momento. As ligações com maiores valores de ductilidade são aquelas resistentes a momento com varões colados, classificadas como de alta ductilidade. As ligações resistentes a momento com placas inseridas na madeira reforçadas com STS também apresentaram bons níveis de ductilidade, mas foram, em geral, classificadas como de ductilidade moderadas.

As ligações estudadas por [19] e [20] apresentaram as maiores rigidezes rotacionais, mas tratam-se de ligações com link de aço ligados a pórticos rígidos e não a pilares de madeira, como em outras ligações. Devido a compressão perpendicular às fibras que ocorre nos pilares, provavelmente este tipo de ligação não teria o mesmo desempenho sem o pilar rígido. Além disso, quando a rotura é governada pela deformação da *end-plate*, a resistência a momento é baixa em comparação àquelas das ligações com placas inseridas na madeira. Já a ligação proposta por [17] apresentou ótimos valores de rigidez rotacional e ductilidade, com rotura final dúctil e resistência a momento adequada. Outra vantagem desse tipo de ligação é o desenvolvimento de deformações plásticas significativas sem dano excessivo a madeira, o que permite a realização de intervenções construtivas apenas substituindo os elementos de aço.

De maneira geral, as ligações com placa de aço inserida na madeira apresentaram baixa rigidez relativa para utilização em estruturas porticadas de edifícios, com exceção da ligação reforçada estudada por [6], que teve o melhor desempenho estrutural. A resistência a momento relativa foi a mais elevada e, apesar da rotura final ser frágil, esta ligação apresentou fator de ductilidade moderado e uma capacidade de dissipação de energia relevante.

Tabela 7: Resumo do comportamento das principais ligações resistentes a momento estudadas

Referência	Altura útil da viga [mm]	Pilar de madeira	Rigidez rotacional relativa [(kNm/rad)/mm ²]	Resistência a momento relativa [kNm/mm]	Fator de ductilidade	Modo de rotura
Lam et al. (2008) [5]	304	Sim	0,0115	0,206	5,53	**
Lam et al. (2010) [6]	304	Sim	0,0229	0,348	5,30	Frágil
Wang et al. (2014) [7]	305	Sim	0,0056	0,190	1,87	Frágil
He et al. (2017) [16]	260	Não	0,0114	0,089	1,95	Frágil
Wang et al. (2019) [15]	305	Sim	0,0086	0,066	2,21	Frágil
Tomasi et al. (2008) [19]	230	Não	0,0874	0,155	8,57	Dúctil
Andreolli et al. (2011) [20]	230	Não	0,0819	0,107	9,03	Dúctil
Yang et al. (2016) [17]	420	Sim	0,0124	0,153	6,00	Dúctil

Conclusões

Apesar da pequena quantidade de pesquisas realizadas sobre as ligações de madeira resistentes a momento, é clara a sua importância, uma vez que a implementação em termos executivos e de projeto viabilizaria a utilização de sistemas arquitetônicos mais flexíveis e mais próximos daqueles executados com aço e betão. Outras propostas de ligações têm surgido, seja com parafusos inseridos no sentido longitudinal ou com cavilhas auto-perfurantes no lugar dos chumbadores tradicionais, mas a quantidade de trabalhos ainda não foi suficiente para realizar uma análise comparativa e muitos deles a ductilidade não se apresenta de maneira relevante.

Em geral, as ligações com placa de aço inserida na madeira apresentaram os maiores valores de resistência a momento, mas a sua rigidez e ductilidade inferiores ainda não possibilitariam sua utilização em edifícios mais altos de madeira sem contraventamentos, mesmo com a inserção de STS como reforço. Com relação as ligações com varões colados na madeira, a forma do elemento de aço que liga a viga ao pilar de madeira tem uma relação muito relevante com a comportamento da ligação, pois é a partir deste elemento que a ruptura desta é governada. A partir dos estudos realizados foi possível constatar que as ligações desse tipo têm maior capacidade de dissipação de energia (deformação plástica) e rigidez rotacional inicial, mas ainda apresentam resistência inferior àquelas com placa de aço inserida na madeira.

Ainda não há uma tendência clara sobre qual tipo de ligação teria uma vantagem absoluta em termos de rigidez, resistência e ductilidade adequada, mas foi possível propor classificações de rigidez rotacional e resistência a momento, com o intuito de contribuir para a avaliação e utilização dessas ligações em futuros estudos ou projetos.

Agradecimentos

Agradecimentos à Fundação de para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo apoio à esta pesquisa sob número BD/06301/2022.

Referências

- [1] Abrahamsen, R. Mjøstårnet-Construction of an 81 m Tall Timber Building. Int. Hoizbau-Fourm IHF 2017 (2017) 1–12.
- [2] Komatsu, K. *Development of Stiffer and Ductile Glulam Portal Frame*, AIP Conf. Proc, 1903 (2017) 020026. <https://doi.org/10.1063/1.5011506>.
- [3] Bryant, A.H.; Gibson, J.A.; Mitchell, T.N.; Thurston, S.J. Nailed. *Moment Joints in Timber Structures*, Bull. N. Z. Natl. Soc. Earthq. Eng., 14 (1981) 223–232. <https://bulletin.nzsee.org.nz/index.php/bnzsee/article/view/972>.
- [4] Komatsu, K.; Kawamoto, N. Modified Moment-Resisting Joints. In Proceedings of the 1991 International Timber Engineering Conference London, London, UK (1991) 3111–3118.
- [5] Lam, F.; Schulte-Wrede, M.; Yao, C.C.; Gu, J.J. Moment Resistance of Bolted Timber Connections with Perpendicular to Grain Reinforcements. In Proceedings of the 10th World Conference on Timber Engineering, Miyazaki, Japan, 2 (2008) 978–985.
- [6] Lam, F.; Gehloff, M.; Closen, M. *Moment-Resisting Bolted Timber Connections*. Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build., 163 (2010) 267–274. <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/stbu.2010.163.4.267>.
- [7] Wang, M.; Song, X.; Gu, X.; Zhang, Y.; Luo, L. *Rotational Behavior of Bolted Beam-to-Column Connections with Locally Cross-Laminated Glulam*, Journal of Structural Engineering 141 (2014) 04014121. <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29ST.1943-541X.0001035>.

- [8] Rebouças, A.S.; Mehdipour, Z.; Branco, J.M.; Lourenço, P.B. *Ductile Moment-Resisting Timber Connections: A Review*, *Buildings* 12 (2022) 240. <https://doi.org/10.3390/buildings12020240>.
- [9] Park, R. Ductility Evaluation from Laboratory and Analytical Testing. In Proceedings of the 9th World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo–Kyoto, Japan, 8 (1988) 605–616.
- [10] Swiss Society of Engineers and Architects SIA. Design Code SIA 265 Timber Structures. Swiss Stand. Assoc. 2003. <http://shop.sia.ch/>
- [11] CEN, EN 12512—Timber Structures—Test Methods—Cyclic Testing of Joints Made with Mechanical Fasteners, Brussels, Belgium (2001).
- [12] Ottenhaus, L.-M.; Jockwer, R.; van Drimmelen, D.; Crews, K. *Designing Timber Connections for Ductility—A Review and Discussion*, *Construction and Building Materials*, 304 (2021) 124621. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124621>.
- [13] Muñoz, W.; Mohammad, M.; Salenikovich, A.; Queeneville, P. Need for a Harmonized Approach for Calculations of Ductility of Timber Assemblies. In Proceedings of the International Council for Research and Innovation in Building and Construction, St. Andrews, Canada (2008).
- [14] Smith, I.; Asiz, A.; Snow, M.; Chui, Y.H. Possible Canadian/ISO Approach to Deriving Design Values from Test Data. In Proceedings of the CIB-W18 Meeting in Florence, Florenz, Italy (2006).
- [15] Wang, M.; Song, X.; Gu, X.; Tang, J. *Bolted Glulam Beam-Column Connections under Different Combinations of Shear and Bending*, *Engineering Structures*, 181 (2019) 281–292.
- [16] He, M.; Zhang, J.; Li, Z. *Influence of Cracks on the Mechanical Performance of Dowel Type Glulam Bolted Joints*, *Construction and Building Materials*, 153 (2017) 445–458.
- [17] Yang, H.; Liu, W.; Ren, X. *A Component Method for Moment-Resistant Glulam Beam-Column Connections with Glued-in Steel Rods*, *Engineering Structures*, 115 (2016) 42–54.
- [18] Vilguts, A.; Stamatopoulos, H.; Malo, K.A. *Parametric Analyses and Feasibility Study of Moment-Resisting Timber Frames under Service Load*, *Engineering Structures*, 228 (2021) 111583.
- [19] Tomasi, R.; Zandonini, R.; Piazza, M.; Andreolli, M. *Ductile End Connections for Glulam Beams*, *Struct. Eng. Int. J. Int. Assoc. Bridge Struct. Eng. (IABSE)*, 18 (2008) 290–296.
- [20] Andreolli, M.; Piazza, M.; Tomasi, R.; Zandonini, R. *Ductile Moment-Resistant Steel-Timber Connections*. *Proc. Inst. Civ. Eng. Struct. Build.*, 164 (2011) 65–78.