

# Construção 2022

*Universidade do Minho, Campus de Azurém  
Guimarães, Portugal*

## Volume II

5 - 7 Dezembro 2022



Universidade do Minho



Departamento de  
Engenharia  
Civil

# rothoblaas

Solutions for Building Technology



ORDEM  
DOS  
ENGENHEIROS



CONSTRUÇÃO MAGAZINE  
REVISTA TÉCNICO-CIENTÍFICA ENGENHARIA CIVIL



MUNICÍPIO DE  
GUIMARÃES



TECMINHO  
UNIVERSIDADE DO MINHO INTERFACE



Universidade do Minho  
Escola de Engenharia



Universidade do Minho

# Construção 2022

## Volume II

### 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

<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>3</b>
<b>MODELOS DE GESTÃO E INFORMAÇÃO.....</b>	<b>3</b>
Como a transição digital afeta a gestão das infraestruturas nos edifícios hospitalares: O legado pós COVID-19 .....	4
Atualizações de revisão de preços comparada com custos reais de mercados dos materiais: estudo de caso .....	14
Methodologies for estimating the built environment stock: an overview .....	27
Agile na gestão de projetos de construção com aplicação de metodologias digitais, com recurso a um estudo de caso .....	35
Comparação de procedimento de orçamentação em ferramentas BIM 5D .....	45
Base de dados: Contratação pública em Portugal entre 2015 e 2022 .....	55
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>61</b>
<b>PATOLOGIA E REABILITAÇÃO.....</b>	<b>61</b>
Termografia de infravermelhos para análise de humidade em paredes – Ensaios preliminares e perspetivas futuras .....	62
Características dos blocos de cimento furados para alvenaria.....	75
Uso de drones na construção .....	88
Reforço de paredes antigas de tijolo com varões helicoidais de aço inox.....	101
Melhoria de desempenho do ETICS, com base em lâ mineral, por homogeneização da superfície de interação entre componentes.....	112
Monitorização de estruturas de construção a partir de varões compósitos entrançados (BCRs) .	121
Análise de revestimentos de início do século XX - a Casa Barbot .....	133
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>141</b>
<b>SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO .....</b>	<b>141</b>
Sustainability assessment of buildings indicators.....	142
Hidratação e desenvolvimento de fase do cimento reciclado termoativado.....	154
Micro-indicadores de circularidade para o setor de construção civil na perspetiva de produtos plásticos .....	166
Caracterização mecânica de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado termoativado .....	177
Resistência à água de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado termoativado .....	186
O potencial dos resíduos industriais no desenvolvimento de novas argamassas para aplicação em fachadas .....	197
An experimental analysis on the thermal performance of particleboards using olive stone and almond shell wastes .....	207
Estudo de formulações de argamassas para sistemas de pavimento radiante com incorporação de agregado siderúrgico.....	217
Argamassas de revestimento com resíduos industriais.....	225
Um contributo para o estudo de betões de menor impacto ambiental .....	234
Incorporação de resíduos agroflorestais em argamassas de cal: resultados preliminares .....	241
Cimento ecossustentável sem clínquer obtido pela mistura de resíduos .....	252
Incorporação de lamas provenientes do corte de rochas ornamentais em materiais cimentícios .	263
Sistema construtivo em painéis pré-fabricados de madeira para edifícios em altura – Análise do desempenho térmico .....	276
Investigação quanto a avaliação da resistência ao esmagamento da madeira em ligações do tipo cavilha.....	288
<b>CAPÍTULO 7.....</b>	<b>297</b>
<b>PATRIMÓNIO CULTURAL .....</b>	<b>297</b>

Propriedades e degradação de pedras muito porosas com expressão no património português... 298	
Conservação de pedras porosas presentes no património com produto multi-ação .....	307

<b>CAPÍTULO 8.....</b>	<b>315</b>
<b>CASOS DE ESTUDO .....</b>	<b>315</b>
Construction project risk management as key to enhanced lifecycle management of constructed assets .....	316
Sistemas de informação para a construção 4.0: Conteúdos, integração e interoperabilidade – Estudo de caso .....	326
Inspeção e diagnóstico de edifícios sujeitos a infiltração de água no porto de Gibraltar .....	336
Reabilitação de paredes de tabique.....	344
Avaliação experimental de tensões geradas num sistema de colagem de cerâmica sob ação de gradientes térmicos .....	349
Conjunto residencial horizontal e o uso da linha de balanço: Um estudo de caso .....	362
Grau de maturidade em relação aos princípios da construção enxuta: Estudo de caso.....	374
Dinâmica construtiva na meseta ibérica .....	382

---

# CAPÍTULO 4

---

## MODELOS DE GESTÃO E INFORMAÇÃO

## Como a transição digital afeta a gestão das infraestruturas nos edifícios hospitalares: O legado pós COVID-19

PEDRAL SAMPAIO Rodrigo<sup>1,a</sup>, COSTA António Aguiar<sup>1,b</sup> e FLORES-COLEN Ines<sup>3,c</sup>

<sup>1</sup>CERIS, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1 1049-001, Lisboa, Portugal

<sup>a</sup>rodrigossampaio@tecnico.ulisboa.pt, <sup>b</sup>aguiar.costa@tecnico.ulisboa.pt,

<sup>c</sup>ines.flores.colen@tecnico.ulisboa.pt

**Palavras-chave:** Healthcare Facility Management, Building Information Modelling; Inteligência Artificial; Transição Digital; Internet das Coisas.

**Resumo.** Os edifícios hospitalares possuem uma estrutura complexa, a que se associa tecnologia bastante avançada, diferenciando-os das demais edificações. A gestão destes edifícios envolve toda a equipa técnica, pacientes e visitantes, enfrentando-se desafios significativos. Desde o início de 2020, a rápida disseminação global da pandemia de COVID-19 gerou impactos sem precedentes na gestão dos edifícios hospitalares, nomeadamente a necessidade crescente de: (i) fornecer espaço para pacientes, equipa médica e armazenamento de equipamentos, (ii) impôr limitações/restrições de acessos das equipas responsáveis pela gestão do edifício, (iii) adaptar o espaço e a sua funcionalidade de forma rápida e eficiente, (iv) garantir um controlo contínuo da qualidade do ar e adequada ventilação dos espaços (v) desenvolver ferramentas digitais para gestão, e (vi) monitorizar os ativos em tempo real. Neste contexto de crescente exigência, a tecnologia e a gestão da informação têm se tornado peças fundamentais no processo de tomada de decisão, desempenhando um papel cada vez mais importante. Portanto, fornecer aos facility managers ferramentas mais eficientes de suporte à decisão resultaria num impacto positivo na produtividade e na eficiência das suas atividades. Respondendo a esta necessidade, este artigo propõe contribuir para a discussão das seguintes questões: como a transição digital pode melhorar a gestão da operação e manutenção das infraestruturas nos edifícios hospitalares? Qual o legado para as equipas de FM nesta gestão dos edifícios hospitalares pós COVID-19?

### Introdução

*Facility Management* (FM) é uma profissão que contribui para a manutenção, melhoria e adequação do ambiente construído, englobando atividades multidisciplinares para garantir a funcionalidade do ambiente construído. Além disso, as atividades de FM integram pessoas, lugares, processos e tecnologia para promover um ambiente produtivo que apoie os negócios não essenciais e/ou essenciais de uma organização em um edifício [1]. Tal definição, engloba de maneira simplificada a arquitetura, a engenharia, a gestão de um negócio e por fim as ciências comportamentais. A complexidade e as habilidades subjacentes à gestão do ambiente construído obrigam esses gestores a se munirem de um arsenal tecnológico especializado, para automatizar tarefas rotineiras, gerir informação, monitorizar o desempenho do edifício e auxiliar nos processos de tomada de decisão [2]. Quando aplicada à gestão de ambientes hospitalares é necessário ainda garantir que os sistemas estão sempre operacionais. Interrupções mínimas nas atividades clínicas podem colocar em causa a saúde e a segurança dos pacientes.

Desde o início de 2020, a rápida disseminação global da pandemia de COVID-19 gerou impactos sem precedentes no FM, sobretudo aplicado a ambientes hospitalares, nomeadamente a necessidade crescente de: (i) fornecer espaço para pacientes, equipa médica e armazenamento de equipamentos, (ii) imposição de limitações/restrições de acessos das equipas responsáveis pela gestão do edifício, (iii) adaptar o espaço e a sua funcionalidade de forma rápida e eficiente, (iv) garantir um controlo contínuo da qualidade do ar e adequada ventilação dos espaços (v) desenvolvimento de ferramentas

digitais para gestão, e (vi) monitorização dos ativos em tempo real [3]. Essas necessidades estão fortemente conectadas às tarefas de FM e, tornam-se ainda mais importantes no contexto de uma crise pandémica. Além disso, a taxa de deterioração dos estabelecimentos de saúde é tipicamente maior do que em outros edifícios, e é agravada pelo fato destes estabelecimentos prestarem serviços essenciais e estarem em funcionamento 24 horas por dia, durante todo o ano [4].

Em estudo realizado pela *Fortune Business Insights* em 2021, o mercado global de FM em 2021 alcançou os 1239.99 mil milhões de dólares. Ainda, é esperado um crescimento para o período de 2022-2029 numa taxa anual de 5,7%, representando uma aceleração do setor a nível global [5]. Nesse contexto, para alcançar uma gestão inteligente e eficiente, os *facility managers* (FMs) necessitam de ferramentas poderosas para organizar o conhecimento produzido por cada um dos envolvidos durante o ciclo de vida da edificação.

Considerando estes desafios e respetivas projeções de investimentos no setor surge uma necessidade cada vez maior de desenvolver práticas mais eficientes e inteligentes para a gestão do ambiente construído, principalmente capazes de promover a saúde dentro destes espaços. Na última década, a aceleração da inovação nos processos de projeto, construção e gestão para o setor da arquitetura, engenharia construção (AEC) e FM, impulsionados por novas ferramentas computacionais, estão alterando o paradigma nesses setores. Na verdade, o impacto da transição digital abrange altos níveis de integração, conectividade, colaboração em tempo real e inovações tecnológicas inteligentes que atendem à procura por métodos personalizados e sustentáveis [6].

A construção 4.0 surgiu como uma nova revolução industrial, disponibilizando um conjunto de novas abordagens e ferramentas para aumentar a eficiência dos processos industriais, especialmente considerando os diversos desafios sociais atuais. Essas tendências podem, potencialmente, melhorar o planeamento e gestão do âmbito, custos, meio ambiente e segurança na cadeia de valor de projetos e ativos, criando assim uma indústria mais resiliente e sustentável [7].

A tecnologia e a gestão da informação têm sido peças fundamentais nesta gestão, desempenhando um papel cada vez mais importante. Com o aparecimento dos edifícios inteligentes, que incorporam a maioria dos espaços com objetos inteligentes, a tecnologia *digital twin* ou gémeos digitais, que ainda está em estágio inicial [8, 9], recorre ao *building information modeling* (BIM), internet das coisas (IoT), inteligência artificial (IA) e tecnologias semânticas para criar uma melhor estratégia de gestão para essas instalações prediais. Essas tecnologias permitem alavancar a forma como os dados e a informação são sistematizados, possibilitando a organização estruturada dessa informação e a sua utilização e tratamento otimizando os processos, e a gestão do ambiente construído [10, 11].

Apesar deste facto, o processo de digitalização na indústria FM ainda se encontra num estágio inicial, quando comparado com a generalidade do setor AEC [12–16]. Considerando estes desafios e respetivos custos, crescentes após a pandemia, surge uma necessidade cada vez maior de desenvolver práticas mais eficientes e inteligentes para a gestão do ambiente construído, principalmente capazes de promover a saúde dentro destes espaços.

Assim, a recente preocupação com uma transição digital efetiva no setor FM oferece uma excelente oportunidade para melhorar a gestão de informação do ambiente construído por meio de ferramentas poderosas para análise de dados, inteligência artificial e simulação, como plataformas BIM interoperáveis. Portanto, a transição digital no FM está reinventando a forma como mantemos e gerimos infraestruturas, melhorando a gestão de informação do ambiente construído e oferecendo um caminho mais sustentável para esse setor.

Nesse sentido, esse artigo propõe contribuir para a discussão das seguintes questões:

- (i) *Como a transição digital pode melhorar a gestão da operação e manutenção das infraestruturas nos edifícios hospitalares?*
- (ii) *Qual o legado para as equipas de FM nesta gestão dos edifícios hospitalares pós COVID-19?*

## Metodologia

Este estudo analisa e categoriza as pesquisas existentes sobre temas relativos a transição digital aplicada ao FM no contexto da gestão de edifícios hospitalares, realizando um método quantitativo e qualitativo em análise bibliométrica. A revisão sistemática da literatura seguiu a estrutura da metodologia *preferred reporting items for systematic review and meta-analyses* (PRISMA) para garantir que os resultados da pesquisa seguem uma abordagem pré-definida e reproduzível e que a qualidade da pesquisa não é influenciada por suposições a priori ou pela experiência do investigador [17]. A revisão sistemática inicia-se com uma fase de identificação, seguida da triagem, elegibilidade e seleção final dos artigos a serem incluídos na análise de conteúdo, conforme observa-se na Figura 1.

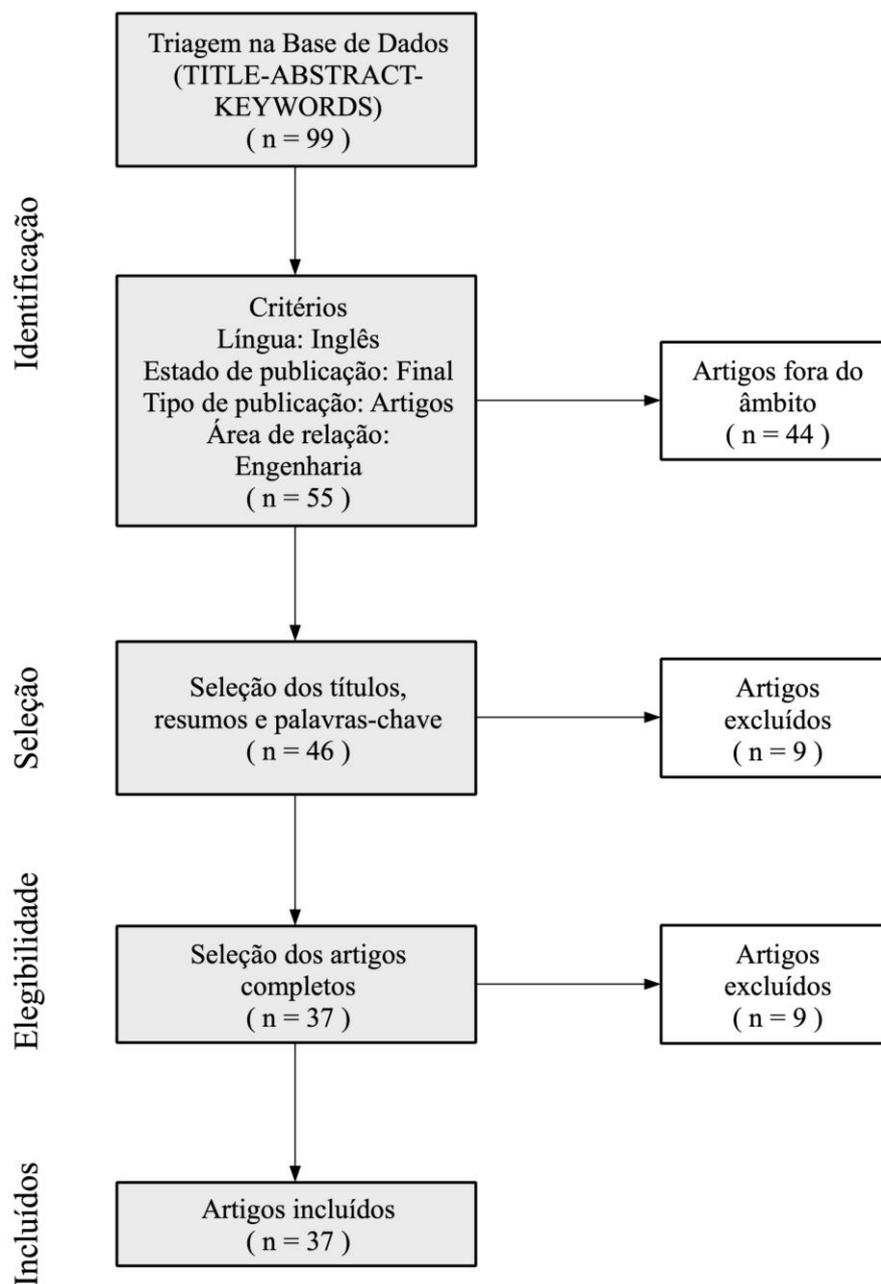


Figura 1: Fluxograma da metodologia PRISMA

Foram definidos 3 critérios básicos de elegibilidade para os artigos a incluir na pesquisa: língua de publicação em inglês; publicações relativas a área da engenharia; e artigos em estado final de publicação. Esta opção foi tomada de modo a abranger a maioria das publicações candidatas à revisão e garantir um maior nível de qualidade dos artigos selecionados. Não foi considerada

restrição para período de pesquisa. Também não foram considerados para este estudo, livros ou mesmo capítulos de livros. Os dados utilizados para a pesquisa provêm da base de dados “Scopus”, tendo esta sido realizada no dia 19 de agosto de 2022. A cadeia de palavras-chave utilizada no motor de busca é a seguinte:

```
TITLE-ABS-KEY ( ( "Facility management" OR "Facilities management" OR "FM" OR "asset management" ) AND ( "BIM" OR "Building Information Modeling" OR "Building Information Modelling" OR "Digital Twin" OR "Industry 4.0" OR digitalisation OR digitalization OR digitisation OR digitization OR "artificial intelligence" OR "internet of things" OR iot OR "virtual reality" OR "augmented reality" OR "immersive technology" ) AND ( "hospital buildings" OR healthcare OR hospital OR clinics ) ) AND ( LIMIT-TO ( PUBSTAGE , "final" ) ) AND ( LIMIT-TO ( DOCTYPE , "ar" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE , "cp" ) OR LIMIT-TO ( DOCTYPE , "re" ) ) AND ( LIMIT-TO ( SUBJAREA , "ENGI" ) ) AND ( LIMIT-TO ( LANGUAGE , "English" ) ).
```

Finalmente, um procedimento de categorização foi realizado por cada autor de forma independente com base em uma abordagem fundamentada. Assim, nossas categorias propostas são construídas após a análise do conteúdo de cada um dos artigos selecionados.

### Análise dos resultados

Inicialmente, cumpre pontuar que a primeira publicação que correlaciona o processo de digitalização para o setor FM aplicado a edifícios hospitalares é de 2011 (Figura 2). Ademais, importa registrar um acréscimo no interesse pelo tema apenas nos últimos 5 anos. Mesmo identificando uma redução no número de publicações em 2021, ano esse em que foram detetados os maiores picos de morte por COVID-19 [18], nota-se novamente uma tendência de aumento em 2022, conforme se observa na Figura 2. Essa tendência de crescimento corrobora a ideia de que este tema tem despertado um interesse por parte da comunidade científica, no sentido de dar uma resposta rápida frente aos novos desafios previstos para o setor nos próximos anos.

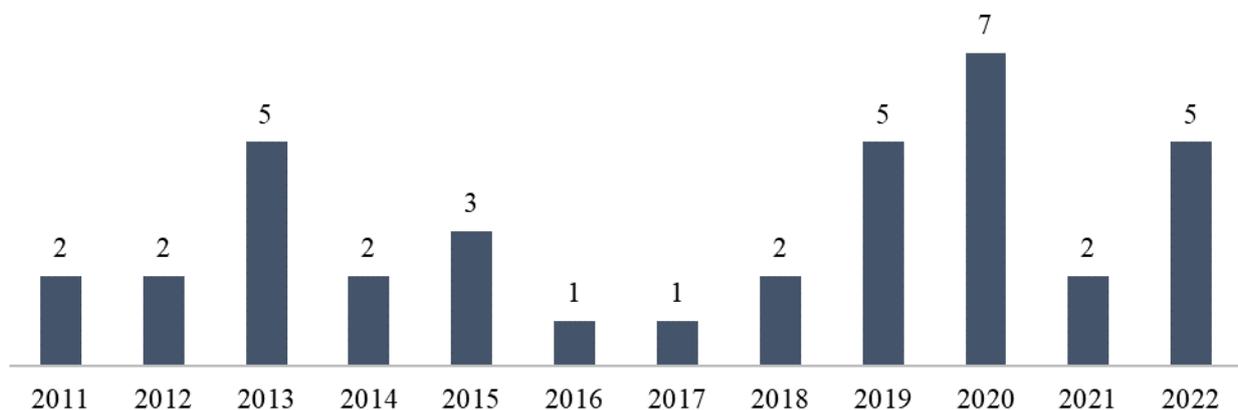


Figura 2: Número de publicações por ano

No que se refere ao tipo de publicação, a pesquisa identificou que, 35% são documentos de conferência e 65% são artigos de revista. Esses artigos têm autoria de 19 diferentes nacionalidades, como mostra a Figura 3. O número total de artigos por nacionalidade é de 50, pois alguns artigos resultaram da participação entre autores de nacionalidades diferentes. Também, o resultado indicou que, os Estados Unidos da América são o país mais representado com 12 dos 50 resultados, seguidos por Reino Unido com 5 artigos, e Noruega, Itália e Hong Kong com 4 artigos cada.

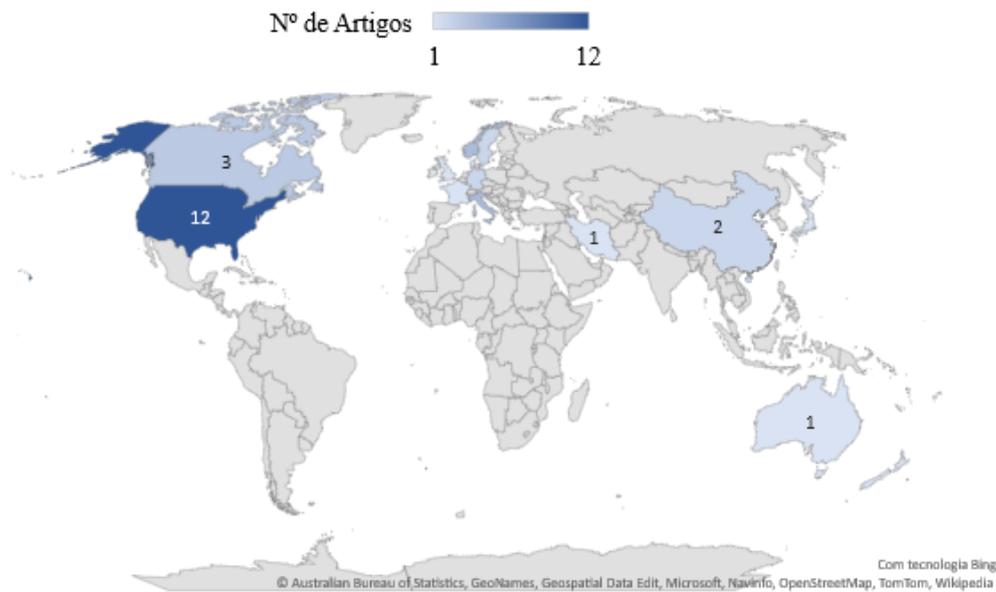


Figura 3: Número de artigos publicados por países

Neste período, de acordo com as condições de seleção, a revista *Facilities* publicou o maior número de artigos na área (29%), seguido pela *Automation in Construction* (13%) e *Applied Science* (8%). Essas 3 principais revistas representam 50% do total de artigos analisados, conforme observa-se na Figura 4.

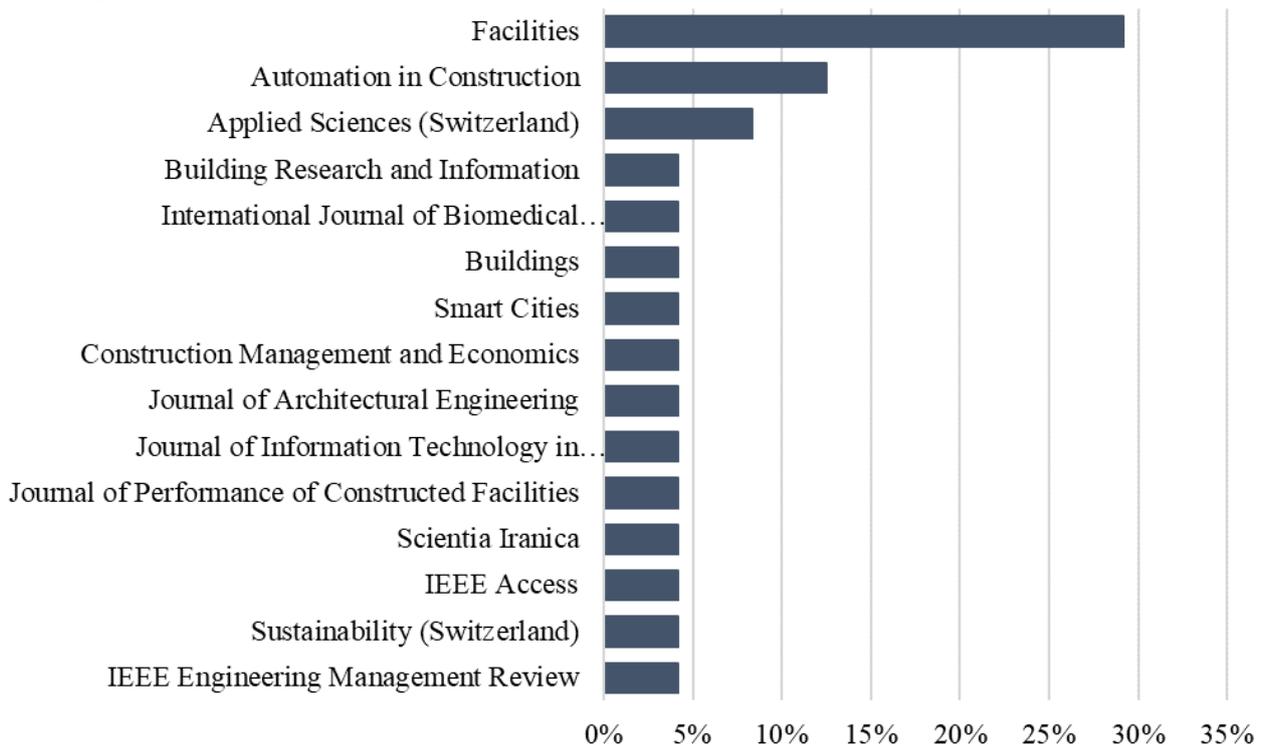


Figura 4: Hierarquia das principais revistas internacionais com artigos relacionados

Um método para visualizar a direção do resultado da pesquisa conforme critérios estabelecidos é plotar as palavras-chave de coocorrência. O software de visualização de semelhanças *VOS Viewer* foi utilizado para gerar a Figura 5 e a Figura 6, apresentando evidências de quão relacionados estão os esforços na área de pesquisa. Quanto maior o número de coocorrências, mais próximas elas estão do mapa. O tamanho do círculo indica o número de ocorrências de cada termo no título, resumo e palavras-chave do artigo. As cores são usadas para indicar *clusters*. As palavras são agrupadas em 2 grupos de termos intimamente relacionados usando uma técnica de agrupamento apresentada por

Waltman *et al.* [19], que se baseia na minimização de distâncias entre palavras-chave. Portanto, as palavras-chave mais associadas se enquadram em um *cluster*.

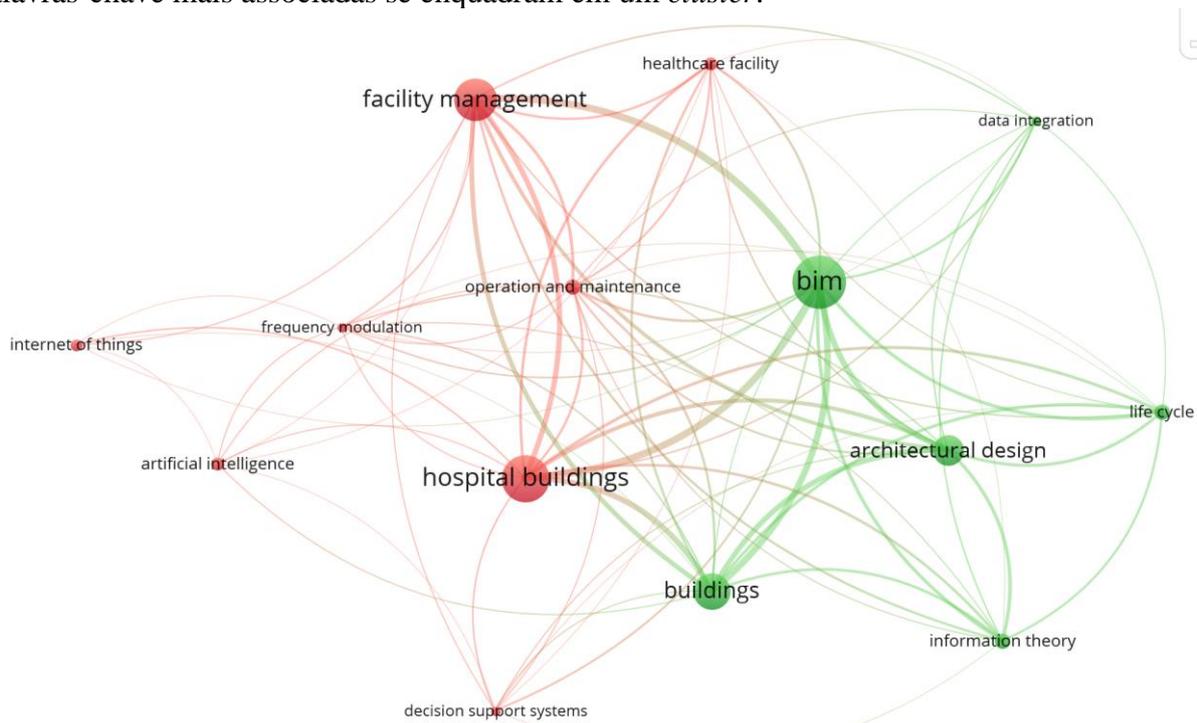


Figura 5: Agrupamento das palavras-chave

Na Figura 6 estão plotadas as palavras-chave ocorridas de acordo com o ano médio de publicação, que indica o ano médio de publicação da pesquisa em que uma palavra-chave aparece. As palavras-chave em verde e amarelo apresentam os tópicos atuais ligados a transição digital aplicada ao FM em ambientes hospitalares.

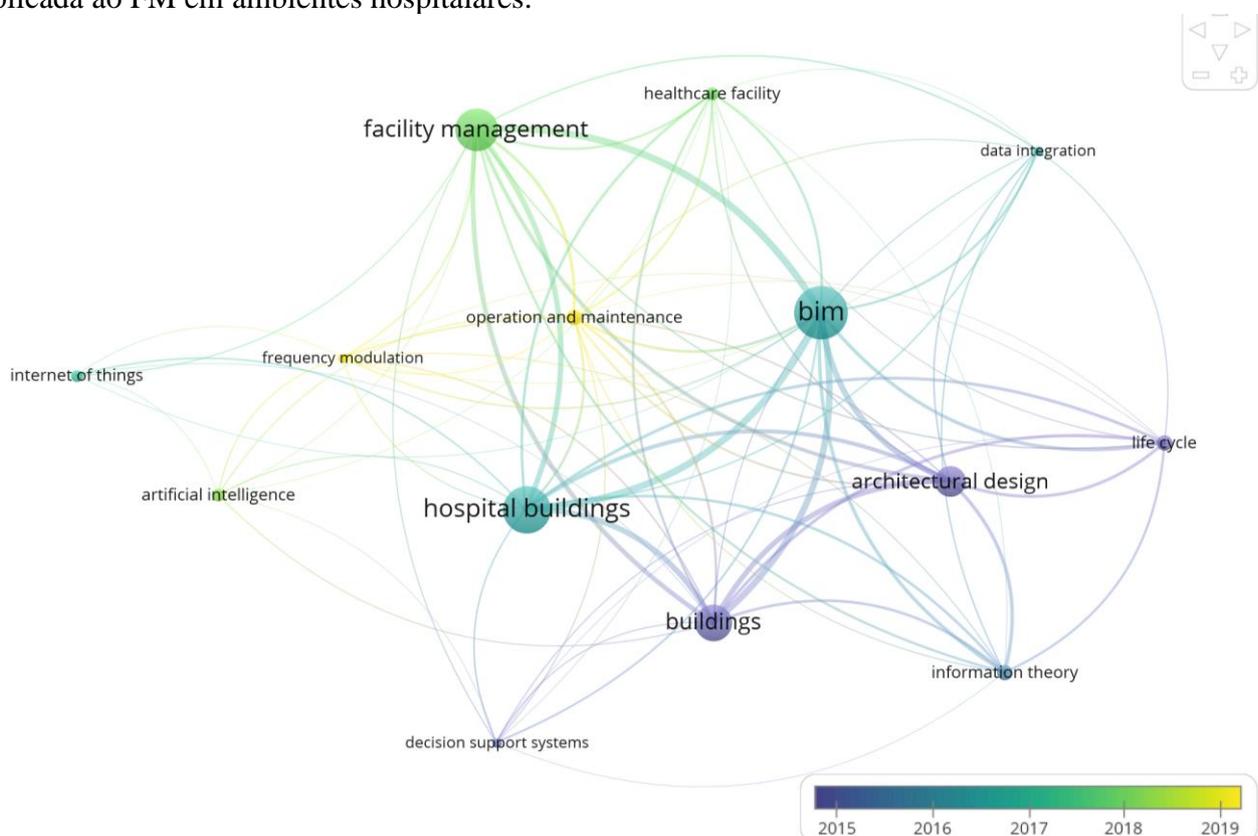


Figura 6: Mapa de palavras-chave por ano

A análise bibliométrica demonstra que BIM, FM e a edifícios hospitalares são as palavras-chave mais utilizadas, conforme indicado na Figura 4 e na Figura 5. No entanto, isso não é surpreendente, pois a pesquisa foi direcionada para estes campos. Adicionalmente, o agrupamento de palavras-chave indica que a maioria dos artigos selecionados se compreendem no grupo do BIM, no entanto, apenas isso, é insuficiente para a categorização de um tema tão atual e específico.

Dessa forma, com base na análise de conteúdo efetuada pelos autores e na frequência de palavras-chave, os tópicos que envolvem a transição digital aplicada ao FM em ambientes hospitalares foram agrupados em 5 categorias que suportam todo o processo de digitalização do setor: (i) integração da informação; (ii) modelos de gestão BIM-FM (iii) inteligência artificial e empresarial; (iv) gestão da informação; (v) tecnologias imersivas; (vi) internet das coisas e; (vii) digital Twin (Figura 7).

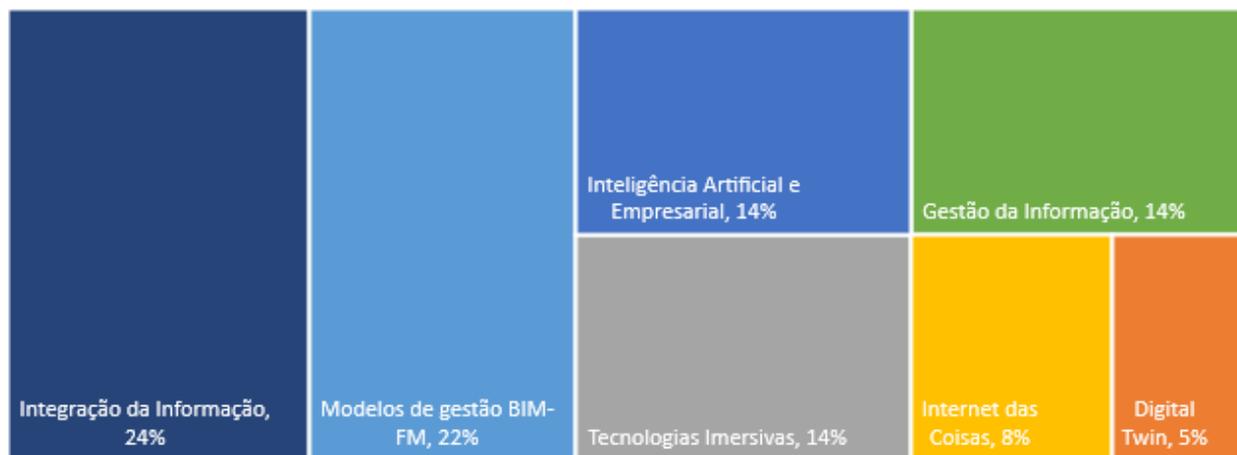


Figura 7: Organização dos tópicos referente a transição digital aplicada ao FM em ambientes hospitalares

## Discussão

A falta de integração de dados e a perda da informação continuam sendo preocupações críticas na fase operacional [20]. Como os modelos BIM podem ser usados durante todo o ciclo de vida e mantidos ao longo do tempo, a conexão entre sistemas de dados digitais e sistemas físicos oferece aos proprietários e operadores um meio poderoso de acessar rapidamente a informação do ambiente contruído [21]. O tópico integração da informação foi encontrado em 24% dos artigos analisados e foi o tema mais citado, seguido pela categoria dos modelos de gestão BIM-FM que aparece em segundo lugar com 22%. Essas categorias também apresentam uma distribuição praticamente constante ao longo do tempo sendo, portanto, alvo de investigação ao longo dos 12 últimos anos analisados. Da análise dos documentos selecionados pode-se inferir que, atualmente barreiras como a interoperabilidade [20, 22] e o baixo nível de envolvimento dos FMs na fase de projeto [23, 24] levam a um descompasso entre as informações necessárias para a fase operacional, as informações fornecidas pelas equipas de projeto e construção e a comunicação com outras ferramentas de gestão e controlo.

Durante toda a fase de Operação e Manutenção (O&M), as equipas de FM coletam e processam dados de diferentes fontes, muitas vezes não considerados adequadamente ao tomar decisões futuras. Ademais, nos hospitais, a programação da manutenção ainda é realizada de forma puramente subjetiva, onde os FMs categorizam a importância e os níveis de prioridade das diferentes intervenções e as planejam de acordo com o custo associado [25].

Atualmente, os gestores de instalações possuem grandes quantidades de dados que exigem tempo e recursos. Além disso, a chave para o agendamento quando uma intervenção necessária é necessária depende da capacidade de prever a condição futura do ativo e, na maioria dos casos, das interconexões entre os vários mecanismos e sistemas do edifício, a diversidade de componentes do edifício e vários fatores ambientais em mudança são negligenciados [26]. Assim, a IA pode

conectar esses dados de maneira inteligente, enquanto a capacidade dos humanos de processar essas informações é muitas vezes limitada

De igual maneira, os avanços tecnológicos atuais em hardware e software têm impulsionado novos desenvolvimentos nesta área, permitindo assim uma maior acessibilidade às tecnologias de motores de jogos. Esse tipo de tecnologia passou a ser utilizado devido aos seus controles intuitivos, tecnologia 3D imersiva e recursos de rede, alavancando, por exemplo, o envolvimento de pessoas ligadas a gestão do ambiente construído com pouco ou nenhum conhecimento de ferramentas BIM [27]. Atualmente, interfaces avançadas como a realidade virtual e realidade aumentada estão se tornando uma forma sofisticada e eficaz de renderizar informações espaciais e melhorar a visualização e a interação para tarefas de FM [28].

Essa categoria das tecnologias imersivas juntamente com a categoria da inteligência artificial e empresaria foram identificadas em 14% das publicações analisadas, entretanto ainda pouco exploradas em ambientes hospitalares.

A IoT é outra tecnologia relevante a ser considerada dentro da estrutura de inovação da indústria de FM. Esse tema foi encontrado em 8% das publicações analisadas. A IoT integra vários processos como: identificação, sensoriamento, computação e interconexão de rede. Os objetos são incorporados com sensores eletrônicos e muitas vezes são equipados com uma inteligência universal para coletar e trocar dados. Além do BIM aplicado ao FM, da IA e das tecnologias imersivas, a IoT pode melhorar a eficiência na gestão do ambiente construído, garantindo a manutenibilidade, criando e atualizando ativos digitais em tempo real, o que torna o processo de gestão muito mais eficiente.

Dessa forma, combinando a metodologia BIM com a tecnologia IoT, é possível obter uma versão digital idêntica do ambiente construído, ou seja, o *Digital Twin* (DT). O DT pode ser definido como a réplica virtual de um objeto ou ambiente físico, como um edifício, infraestrutura ou cidade [29]. Além disso, os componentes físicos e virtuais são interconectados em tempo real. Assim, são necessários pelo menos três componentes: (i) o ambiente físico, (ii) o modelo digital e (iii) a ligação entre os dois. Apesar desse tema ter sido encontrado em apenas 5% dos artigos analisados, nota-se recentemente um importante interesse por parte da comunidade científica em entender os benefícios dessa nova metodologia num processo de gestão mais integrado, inteligente, eficiente e sustentável.

## Considerações finais

Esta revisão sistemática da literatura investigou artigos publicados nos últimos 12 anos sobre a a perspectiva da transição digital aplicada ao *facility management* (FM) em ambientes hospitalares.

Dos resultados sobre tópico selecionado destacam a predominância de trabalhos na definição/integração de modelos *building information modelling* (BIM) com ferramentas específicas dedicadas a fase de operação e manutenção. Outros temas relevantes aqui relacionados foram a utilização cada vez mais difusa da inteligência artificial e empresarial para análise e parametrização das informações. Também a aquisição de dados em tempo real através de sensores interligados e a utilização de tecnologias imersivas são temas que se destacam dentro do processo da transição digital que a gestão de ativos está enfrentando nos últimos tempos.

A análise também apontou uma tendência crescente da comunidade científica para uma gestão mais integrada, automatizada e inteligente dos edifícios hospitalares, correlacionado os impactos da crise pandêmica do COVID-19. Entretanto, apesar das tendências apontarem para a construção de edifícios com sensores sofisticados e sistemas informatizados inteligentes, capazes de fornecer as informações sobre o estado e desempenho de seus elementos em tempo real, ainda se constata um baixo nível de maturidade tecnológica das empresas do setor de FM em especial para a gestão de edifícios hospitalares.

Ao nível de maturidade digital, o número limitado de publicações destaca que, neste momento, os sistemas de controlo e gestão não são totalmente capazes de gerir toda a fase operacional dos edifícios hospitalares. Assim, o valor agregado da digitalização ajudará esses gestores a superar as questões aqui apontadas para lidar com as crescentes demandas de saúde e, com isso, capacitá-los para mitigar os impactos de uma nova e futura pandemia.

Como tendências mais relevantes no curto prazo, a pesquisa revelou que toda essa nova metodologia de gestão da informação através de uma réplica digital do elemento físico e suas ferramentas e tecnologias associadas, estão trazendo uma maior interoperabilidade entre softwares e uma maior interatividade ao processo.

Dessa forma, o aumento de funcionalidades e o nível de investimento na área são essenciais para o crescimento da digitalização nessa fase operacional, sobretudo em estruturas complexas, como no caso, dos edifícios hospitalares.

## Agradecimentos

Este trabalho foi financiado pela bolsa de investigação ao abrigo de um contrato do Instituto Superior Técnico (IST), Universidade de Lisboa, 1018P.06013 / REV@Construção número 06013, e pela unidade de investigação CERIS. Este trabalho é cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020) e do Programa Operacional Regional de Lisboa (PO Lisboa) [Projeto n.º 046123; Referência de Financiamento: POCI-01-0247-FEDER-046123 e LISBOA-01-0247-FEDER-046123].

## Referências

- [1] EN ISO 41001. BSI Standards Publication Facility management - Management systems - Requirements with guidance for use (ISO 41001:2018). 2018.
- [2] Becerik-Gerber B, Jazizadeh F, Li N, *et al.*, *Application Areas and Data Requirements for BIM-Enabled Facilities Management*. J Constr Eng Manag, 138 (2012) 431–442.
- [3] Lin CL, Chen JKC, Ho HH., *BIM for smart hospital management during covid-19 using MCDM*. Sustainability (Switzerland); (2021) 13, DOI: 10.3390/su13116181.
- [4] Yousefli Z, Nasiri F, Moselhi O., *Healthcare facilities maintenance management: a literature review*. Journal of Facilities Management, 15, (2017) 352–375.
- [5] Fortune Business Insights. *Facility Management Market Size, Share & Covid-19 Impact Analysis, By Service Type (Hard Services, Soft Services, and Others Services), By Industry (Healthcare, Government, Education, Military & Defense, Real Estate and Others) and Regional Forecast, 2022-2029*. 2021.
- [6] Muñoz-La Rivera F, Mora-Serrano J, Valero I, *et al.*, *Methodological-Technological Framework for Construction 4.0*. Archives of Computational Methods in Engineering, 28, (2021) 689–711.
- [7] Forcael E, Ferrari I, Opazo-Vega A, *et al.*, *Construction 4.0: A literature review*. Sustainability (Switzerland), 12, (2020) 1–28.
- [8] Rasheed A, San O, Kvamsdal T., *Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective*. IEEE Access, 8, (2020) 21980–22012.
- [9] Yitmen I, Alizadehsalehi S, Akiner İ, *et al.* *An adapted model of cognitive digital twins for building lifecycle management*. Applied Sciences (Switzerland), (2021) 11, DOI: 10.3390/app11094276.
- [10] Chiu WYB, Lai JHK., *Building information modelling for building services engineering: benefits, barriers and conducive measures*. Engineering, Construction and Architectural Management, 27, (2020) 2221–2252.
- [11] Succar B. *Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders*. Autom Constr, 18, (2009) 357–375.

- [12] Bonanomi M., *Building Information Modeling (BIM) and Facility Management (FM)*. In: Knowledge Management and Information Tools for Building Maintenance and Facility Management. Springer International Publishing, (2016) 149–177.
- [13] Wong JKW, Ge J, He SX., *Digitisation in facilities management: A literature review and future research directions*. Automation in Construction, 92, (2018) 312–326.
- [14] Ilter D, Ergen E., *BIM for building refurbishment and maintenance: current status and research directions*. Structural Survey, 33, (2015) 228–256.
- [15] Pärn EA, Edwards DJ, Sing MCP. *The building information modelling trajectory in facilities management: A review*. Automation in Construction, 75, (2017) 45–55.
- [16] Volk R, Stengel J, Schultmann F., *Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs*. Automation in Construction, 38, (2014) 109–127.
- [17] Liberati A, Altman DG, Tetzlaff J, et al. *The PRISMA statement for reporting systematic reviews and meta-analyses of studies that evaluate healthcare interventions: explanation and elaboration*. BMJ, (2009) 339, DOI: 10.1136/bmj.b2700.
- [18] Johns Hopkins University CSSE COVID-19 Data. *COVID-19 Data Repository by the Center for Systems Science and Engineering (CSSE) at Johns Hopkins University*. Our World in Data.
- [19] Waltman L, van Eck NJ, Noyons ECM., *A unified approach to mapping and clustering of bibliometric networks*. J Informetr, 4, (2010) 629–635.
- [20] Lucas J, Bulbul T, Thabet W., *An object-oriented model to support healthcare facility information management*. Autom Constr, 31 (2013) 281–291.
- [21] Peng Y, Lin JR, Zhang JP, et al., *A hybrid data mining approach on BIM-based building operation and maintenance*. Build Environ, 126, (2017) 483–495.
- [22] Ghosh A, Chasey A., *Structuring Data Needs For Effective Integration Of Building Information Modeling (Bim) With Healthcare Facilities Management*. Research Publishing Services, (2013) 1471–1476.
- [23] Støre-Valen M., *FM and clinical employees' involvement in the design of eight Norwegian hospital projects*. Facilities, 39, (2021) 778–801.
- [24] Marinelli M., *Emergency Healthcare Facilities: Managing Design in a Post Covid-19 World*. IEEE Engineering Management Review, 48, (2020) 65–71.
- [25] Ahmed R, Nasiri F, Zayed T., *Two-Stage Predictive Maintenance Planning for Hospital Buildings: A Multiple-Objective Optimization-Based Clustering Approach*. Journal of Performance of Constructed Facilities, (2022) 36, DOI: 10.1061/(asce)cf.1943-5509.0001691.
- [26] Demirdöğen G, Işık Z, Arayıcı Y., *Determination of Business Intelligence and Analytics-Based Healthcare Facility Management Key Performance Indicators*. Applied Sciences (Switzerland), (2022) 12, DOI: 10.3390/app12020651.
- [27] Merschbrock C, Lassen AK, Tollnes T, et al. *Serious games as a virtual training ground for relocation to a new healthcare facility*. Facilities, 34, (2016) 788–808.
- [28] Collin A, Tamati J., *Virtual Reality Activity Based Workplace Simulation Impact on Healthcare Facilities Space Management*. 2020.
- [29] Song Y, Li Y, Candidate PD. *Digital Twin Aided Healthcare Facility Management: A Case Study of Shanghai Tongji Hospital*.

## Atualizações de revisão de preços comparada com custos reais de mercados dos materiais: estudo de caso

OLIVEIRA Rui A. F.<sup>1,a</sup>, LOPES Jorge<sup>1,b</sup> e ABREU Maria I.<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup> Instituto Politécnico de Bragança, Campus de Santa Apolónia 5300-253 Bragança, Portugal

<sup>a</sup>roliveira@ipb.pt, <sup>b</sup>lopes@ipb.pt, <sup>c</sup>isabreu@ipb.pt

**Palavras-chave:** Revisão de Preços, Fórmulas Revisão de Preços, Índices de Custos, Coeficiente de Atualização Mensal, Regime Excecional e Temporário, Preços.

**Resumo.** O controlo de custos de empreitadas envolve maior rigor, exigindo metodologias e gestão cada vez mais ajustada às respetivas obras. Os consideráveis aumentos de custos de materiais, promovido pela atual conjuntura de mercado global, exigem tomadas de decisão ajustadas à realidade. A revisão de preços aplicável às empreitadas tem em consideração a atualização de preços com base nos índices atualizados de materiais, mão-de-obra e de equipamentos, onde por vezes não compensam a efetiva real subida desses preços. A recente legislação que alterou o regime aplicável da revisão de preços contempla a possibilidade de os interessados apresentarem correção ou alteração do regime de revisão de preços, quando a apresentada esteja desajustada às especificidades da empreitada ou quando a mesma seja omissa no caderno de encargos. O artigo envolve casos de simulação real de uma obra onde foi aplicada revisão de preços, fazendo-se comparações entre a compensação retribuída ao empreiteiro atendendo ao preço de determinados materiais na data considerada base de cálculo, e comparando com a efetiva inflação desses materiais, sob a forma de diferentes cenários com base na recente legislação. Este estudo demonstra, que mantendo as fórmulas que servem de base ao cálculo da revisão de preços, é possível o empreiteiro ter retribuições que podem ser suficientes para compensar as eventuais subidas de preços de mercado, sem aplicar outras modalidades, podendo os problemas de gestão ter outras causas. Em oposição determinados ajustamentos da fórmula tipo de revisão de preços pode revelar retribuições superiores aos custos reais de mercado dos materiais.

### Introdução

Têm-se assistido a um substancial aumento da inflação, resultante do aumento de custos, motivada por várias razões apontadas como causas, tais como pandemia Covid 19, mas sobretudo pelo conflito entre Rússia e Ucrânia [1]. Numa guerra, em qualquer lugar, os países em conflito podem gerar inflação e desemprego em simultâneo, movendo-se estas variáveis juntas e quase proporcionalmente [2]. Prichet et al. (2011) definiram a inflação como: “*um aumento no nível de preços de um bem ou serviço ou cesta de mercado de bens e/ou serviços*” [3].

A taxa de inflação afeta negativamente a indústria da construção com a subida do orçamento estimado da obra, levando à revisão de preços (materiais, mão-de-obra, equipamentos) e que por vezes termina com o projeto por excesso de custos, causando sérios constrangimentos aos stakeholders [4]. Verifica-se que muitos stakeholders estão a adotar critérios ESG (Environmental, Social and Governance) nos seus investimentos, indo ao encontro de uma procura de maior estabilidade nos mercados e com riscos ponderados [5].

Especificamente, o preço de muitos dos produtos transacionados nos mercados têm vindo a aumentar substancialmente, como é possível verificar na taxa de variação homologa desses produtos [6]. O preço dos materiais de construção não tem sido diferente do resto dos produtos, com subidas de preços, escassez de matérias-primas para o seu fabrico (processo produtivo), falta de mão de obra, e mesmo relacionado com a falta de oferta (processo logístico), agravados também pela instabilidade de preços da energia. O Decreto-lei 36/2022 de 20 de maio cita que, “*no período em questão e a título de exemplo, que o aço em varão e perfilados aumentou 41,7%, a chapa de aço*

macio, 44,0%, o fio de cobre revestido, 38,5%, betumes a granel, 61,2%, derivados de madeira, 65,2%, vidro, 28,1%, e tubo de PVC, 71,3%” [7].

No entanto, esta subida de preços é sempre refletida no final da cadeia, através do aumento de preços do produto da construção, tais como da habitação, de empreitadas de construção. Segundo o INE, “No 1º trimestre de 2022, o preço mediano de alojamentos familiares em Portugal foi de 1 454 €/m<sup>2</sup>, correspondendo a uma taxa de variação homóloga de +17,2%”, registando-se o valor mais elevado em Faro, seguindo-se Lagoa [8].

Embora seja expectável um abrandamento dos níveis de construção em Portugal, a breve prazo não parece que seja um cenário já enraizado, pois a construção de edifícios desceu para 2% em Junho 2022, quando em maio registou 2,2% de crescimento homólogo, tendo a engenharia civil aumentado de 1,2% em maio 2022 para 1,5% em Junho 2022. No entanto os índices de emprego e de remunerações na construção, registou-se em Junho 2022 um panorama de desaceleração do índice de produção, constatando-se 2% (emprego) e 6,2% (remunerações), tendo em maio índices na ordem de 2,1% e 6,5% respetivamente [9]. Já a taxa de variação homóloga em Junho 2021 era de 2,9% (emprego) e de 9,5% (remunerações), o que representa um abrandamento e consequente desaceleração em Junho 2022 [9]. Já a nível europeu, segundo o Eurostat, a produção na construção na zona Euro subiu 0,1% e na União Europeia 0,6%, comparativamente com Junho 2021, mas recuou -1,3% (zona euro) e de -1,2% (União Europeia) face a maio 2022 [10].

De referir que com a subida abrupta de preços dos materiais, e frequente escassez de mão-de-obra, muitas empreitadas submetidas a concurso não tiveram concorrentes, outras foram abandonadas pelos empreiteiros já durante a construção, entre outros problemas. O Governo português em reação a este fenómeno publicou recentemente o “Regime Excepcional e Temporário no âmbito do aumento dos custos com impacto em contratos públicos”, através do Decreto-lei 36/2002 [7], onde sob determinadas condições é possível mudanças significativas da revisão de preços, de modo a atenuar prejuízos. Sabe-se que a revisão de preços é a forma que os empreiteiros têm de atualização de preços decorrentes de inflação, face à distância temporal entre o contrato formalizado com preços acordados e o tempo efetivo de realização da empreitada [11]. No entanto, em algumas situações deixa-se a questão se a revisão de preços expressa a efetiva atualização de preços face à conjuntura de mercado, situação que se pretende clarificar com este artigo.

O artigo encontra-se estruturado com introdução, contexto da revisão de preços, metodologia e caso de estudo, e principais conclusões.

## O contexto da revisão de preços

**Revisão de preços e seu enquadramento histórico.** A revisão de preços consiste na determinação das variações, para mais ou para menos, dos custos de mão-de-obra, dos materiais e dos equipamentos, tendo como base os correspondentes valores considerados no mês anterior à data-limite fixada para a entrega das propostas. Ora seja, as variações são estudadas tendo como base o mês anterior à entrega das propostas e com base no plano de pagamentos elaborado em fase de proposta pelo empreiteiro, abrangendo até à data do termo do prazo de execução contratualmente estabelecido, considerando ainda as prorrogações legais. A revisão de preços é obrigatória, tendo em consideração o Decreto-lei n.º 6/2004 (e demais alterações) e segundo cláusulas específicas insertas nos cadernos de encargos e nos contratos.

Em termos de contexto histórico, a Lei 1578 de 10 abril 1924 considera que a revisão de preço passou a ser possível nos contratos devendo o caderno de encargos incluir uma cláusula sobre essa temática [12]. Posteriormente em 1967 surge o Decreto-Lei n.º 47945 de 16 de setembro, surge o regime jurídico da revisão de preços, onde fica instituída a obrigatoriedade da revisão em obras com mais de 180 dias, atendendo aos valores do mês em que tenham sido abertas as propostas. Neste diploma, os trabalhos não previstos em projeto são abrangidos na revisão de preços, “desde que a sua realização tenha resultado de contrato adicional ou de alterações impostas ou aprovadas pela entidade competente” [13]. Em 1975 o Decreto-lei n.º 273-B/75, de 3 de junho, surge na perspetiva de corrigir as falhas consagradas no Decreto-lei n.º 781/74, de 31 de dezembro, revogando o diploma de 1967, considerando importantes alterações no regime da revisão de preços e

esclarecendo que os índices são publicados “*por despacho do Secretário de Estado das Obras Públicas, sob proposta de uma comissão permanente que para o efeito nomeará, e em que terão assento representante ou representantes dos industriais da construção civil e obras públicas*” [14].

Posteriormente, em 1986, surge a publicação do Decreto-lei n.º 348-A/86, de 16 de outubro, contemplando alterações no anterior regime de revisão de preços aprovado, o regime de revisão de preços é alterado, sofrendo ajustamentos e melhorias resultantes da evolução da conjuntura económica e da experiência adquirida com a aplicação da legislação anterior. Mais tarde em 1988, passou a funcionar como Comissão especializada a Comissão de Índices de Fórmulas e Empreitadas (CIFE) enquadrada no exercício das funções do Conselho de Mercados de Obras Públicas e Particulares (CMOPP) [15]. O Decreto-lei n.º 6/2006 de 6 de Janeiro trouxe consideráveis alterações aos diplomas legais vigentes até à data sobre revisão de preços, aperfeiçoando mecanismos para maior adequação à realidade das empreitadas [11], salientando-se: a compatibilização com as disposições do regime jurídico de empreitadas de obras públicas [16]; Redução do limite mínimo do coeficiente de atualização de 3% para 1%, quando a revisão de preços é feita por fórmula (harmonização com a dinâmica de custos atual) e de 4% para 2%, no caso de revisão de preços por garantia de custos; Substituição do cronograma financeiro pelo plano de pagamentos, como referência nos cálculos de revisão de preços; entre outras.

Recentemente, o Decreto-Lei n.º 73/2021 de 18 de Agosto procede à primeira alteração do Decreto-lei n.º 6/2006, salientando-se no mesmo: a possibilidade de no caso de omissão no caderno de encargos ou de a considerarem desajustada às especificidades da empreitada, os interessados poderem apresentar a fórmula de revisão de preço; Substituição da necessidade de homologação da atualização dos índices de revisão de preços pelo membro do Governo (da área das infraestruturas) pela sua submissão à aprovação do conselho diretivo do Instituto dos Mercados Públicos, do Imobiliário e da Construção (IMPIC); O valor apurado, resultante da revisão de preços, no final do prazo contratual, acrescido das prorrogações legais, não está sujeito ao limite imposto pelo preço base, nem aos limites que determinaram a escolha do procedimento [17].

**Abrangência e metodologia de aplicação da revisão de preços.** O regime de revisão de preços das empreitadas de obras públicas e de obras particulares e de aquisição de bens e serviços tem como âmbito de aplicação aos “*contratos de aquisição de bens móveis e os contratos de aquisição de serviços regulados no CCP, bem como os contratos de empreitadas de obras particulares em que se estipule o direito à revisão de preços*” [11].

A Revisão de preços prevê os seguintes métodos: Fórmula; Garantia de custos; Fórmula e garantia de custos. A fórmula é denominada polinomial e tem a seguinte configuração (Eq. 1):

$$C(\text{índice } t) = a \times \frac{S(\text{índice } t)}{S(\text{índice } o)} + b \times \frac{M(\text{índice } t)}{M(\text{índice } o)} + b' \times \frac{M'(\text{índice } t)}{M'(\text{índice } o)} + b'' \times \frac{M''(\text{índice } t)}{M''(\text{índice } o)} + \dots + c \times \frac{E(\text{índice } t)}{E(\text{índice } o)} + d \quad (1)$$

Sendo:

- C (índice t) é o coeficiente de atualização mensal a aplicar ao montante sujeito a revisão, obtido a partir de um somatório de parcelas com uma aproximação de seis casas decimais e arredondadas para mais quando o valor da sétima casa decimal seja igual ou superior a 5, mantendo -se o valor da sexta casa decimal no caso contrário;

- S (índice t) é o índice dos custos de mão-de-obra relativo ao mês a que respeita a revisão;

- S (índice o) é o mesmo índice, mas relativo ao mês anterior ao da data-limite fixada para a entrega das propostas;

- M (índice t), M' (índice t), M'' (índice t),... são os índices dos custos dos materiais mais significativos incorporados ou não, em função do tipo de obra, relativos ao mês a que respeita a revisão, considerando -se como mais significativos os materiais que representem, pelo menos, 1 % do valor total do contrato, com uma aproximação às centésimas;

- M (índice o), M' (índice o), M'' (índice o),... são os mesmos índices, mas relativos ao mês anterior ao da data limite fixada para a entrega das propostas;

- E (índice t) é o índice dos custos dos equipamentos de apoio, em função do tipo de obra, relativo ao mês a que respeita a revisão;

- E (índice 0) é o mesmo índice, mas relativo ao mês anterior ao da data-limite fixada para a entrega das propostas;

- a, b, b', b'',..., c são os coeficientes correspondentes ao peso dos custos de mão-de-obra, dos materiais e dos equipamentos de apoio na estrutura de custos da adjudicação ou da parte correspondente, no caso de existirem várias fórmulas, com uma aproximação às centésimas;

- d é o coeficiente que representa, na estrutura de custos, a parte não revisível da adjudicação, com aproximação às centésimas; o seu valor é 0,10 quando a revisão de preços dos trabalhos seja apenas feita por fórmula.

O Somatório de “a + b + b' + b'' +... + c + d” deve ser igual à unidade. O monómio “a” pode ser transformado num polinómio com diferentes profissões desde que representem cada uma, mais de 1% do valor contratual, sendo os respetivos S(índice t) e S(índice 0) aplicados a cada uma dessas profissões. Por sua vez, o Despacho n.º 22 637/2004 (2ª série), de 12 de Outubro, e o Despacho n.º 1592/2004 (2ª série), de 8 de Janeiro consideram fórmulas tipo de revisão de preços com base em diferentes tipologias de obras, definindo assim os coeficientes “a, b, b', b'',..., c”, que atendem à especificidade de cada. Os despachos definem um total de 23 fórmulas tipo que atendem a diversas tipologias de obras. A Tabela 1 apresenta os coeficientes de a, b, b', b'',...,c, das fórmulas tipo F05 (Reabilitação Ligeira de Edifícios) e F21 (Redes de abastecimento de água e de águas residuais).

Tabela 1: Coeficientes das fórmulas tipo de revisão de preços F05 e F21

	a	b*												c	d	
		b03	b10	b13	b18	b20	b22	b23	b24	b29	b32	b42	b43			b50
F05	0.45	0.01	0.10	0.01	0.01	0.01		0.01		0.22		0.02			0.07	0.10
F21	0.28	0.04			0.01	0.01	0.04		0.01		0.07		0.01	0.25	0.18	0.10

No entanto é recomendável que cada obra tenha uma ou várias fórmulas de revisão de preços que atendam o mais possível à realidade da obra a executar, devendo ser alvo de estudo detalhado. A aplicação rege-se pelo plano de pagamentos apresentado pelo empreiteiro aquando da fase de apresentação das propostas, existindo também a consideração de ajustamentos na fórmula em caso de adiantamentos concedidos pelo Dono de Obra ao empreiteiro. No entanto, durante a realização da obra há desvios de prazo e dificilmente se consegue que a obra decorra de acordo com o estipulado no descrito plano. Para tal, é de considerar o disposto no artigo 14º, nomeadamente [17]:

- *“Sempre que se verifique atraso por caso de força maior ou imputável ao dono da obra, o empreiteiro deve submeter à aprovação do dono da obra um novo plano de pagamentos reajustado, que serve de base ao cálculo da revisão de preços dos trabalhos por executar.*

- *Quando se verifique atraso por facto imputável ao empreiteiro, os indicadores económicos a considerar na revisão de preços são os correspondentes ao período em que os trabalhos por ela abrangidos deveriam ter sido executados, exceto quando o C (índice t) resultante desse cálculo for inferior ao que resultaria da aplicação dos indicadores económicos do mês em que os trabalhos foram efetivamente executados, caso em que deve ser considerado o C (índice t) de menor valor.*

- *Quando se verifique avanço no cumprimento do plano de trabalhos e do correspondente plano de pagamentos aprovados, os indicadores económicos a considerar na revisão são os correspondentes ao período em que os trabalhos por ela abrangidos foram efetivamente executados”.*

**O contexto do regime excecional e temporário de revisão de preços.** O regime excecional da revisão de preços está publicado no Decreto-Lei n.º 36/2022, de 20 de maio e pretende adequar o modo de revisão de preços existente no contrato à estrutura de custos real da empreitada, através do desenvolvimento de um mecanismo de revisão que atenda as sucessivas alterações dos preços dos materiais, mão de obra e equipamentos de apoio, nos termos definidos pelo Decreto-Lei 6/2004 de 6 de janeiro. A aplicação deste depende da iniciativa do empreiteiro e atende especialmente para os contratos de empreitadas de obras públicas com revisão de preços obrigatória (artigo 382.º do CCP [16]), podendo ter aplicação noutros regimes [7].

O empreiteiro pode apresentar um pedido de revisão extraordinária de preços desde que um determinado material, tipo de mão de obra ou equipamento de apoio, carecendo de critérios de elegibilidade (n.º 1 do artigo 3º), nomeadamente [7]: *“a) Represente, ou venha a representar*

*durante a execução, pelo menos 3 % do preço contratual; e b) A taxa de variação homóloga do custo seja igual ou superior a 20%”.*

O Dono de Obra tem de se pronunciar no prazo de 20 dias da receção do pedido sobre a forma de revisão de preços proposta, pelo empreiteiro, estando esta aprovada tacitamente caso não o faça nesse prazo, podendo, em alternativa o Dono de Obra propor [7]: *“a) Apresentar, de forma devidamente fundamentada, uma contraproposta; b) Realizar a revisão de preços segundo a forma contratualmente estabelecida, sendo, para os casos de revisão por fórmula, os coeficientes de atualização (Ct) resultantes dos respetivos cálculos multiplicados por um fator de compensação de 1,1; c) Incluir determinados materiais e mão de obra com revisão calculada pelo método de garantia de custos, aplicando -se aos restantes a fórmula constante do contrato, sem qualquer majoração”.* Em caso de divergência ou não acordo sobre a forma de revisão extraordinária em causa, os preços são revistos atendendo à contraproposta do dono da obra, ou, se esta não existir, com base nas alíneas b) e c) referidas anteriormente. A revisão extraordinária de preços é aplicada a todo o período de execução da obra. Em termos gerais, a substancial subida de preços de um ou diversos materiais, ou eventualmente de mão-de-obra, pode gerar aumento dos índices a, b, b', b''...e de certo modo ao aumento da percentagem (acima de 3%) que estes representam no preço contratual da obra. Esta situação repercute-se na necessária adaptação da fórmula de revisão de preços utilizada para o efeito no Caderno de Encargos da Empreitada, mas não sendo a única possibilidade de aplicação. Assim, perante eventuais prorrogações de prazos, sempre que se verifique atraso no cumprimento do plano de trabalhos, por motivos de não obtenção dos materiais necessários à execução por motivos não imputáveis ao empreiteiro devidamente comprováveis, o dono de obra pode aceitar *“no prazo de 20 dias a contar da receção do pedido, sob pena de aceitação tácita, prorrogar o prazo de execução, pelo tempo estritamente necessário, sem qualquer penalização e sem qualquer pagamento adicional ao empreiteiro”* [7]. Nestes casos, *“o empreiteiro submete à aprovação do dono da obra um novo plano de pagamentos reajustado, que serve de base ao cálculo da revisão de preços dos trabalhos por executar”* [7].

## **Metodologia de investigação e aplicação de caso de estudo**

**Metodologia utilizada e aplicação de estudo de caso.** Como metodologia para o estudo, é utilizado um edifício, apresentando-se a fórmula de cálculo de Revisão de preços prevista no Caderno de Encargos, bem como o Plano de Pagamentos previstos e o respetivo Plano de Trabalhos submetido pelo empreiteiro. A partir desta informação procede-se à aplicação do cálculo da Revisão de preços para os meses envolvidos, chamada de “Cenário 1”.

Procede-se à análise da fórmula de revisão de preços presente no Caderno de Encargos e procede-se ao longo do estudo à aferição se estas são efetivamente as mais ajustadas para a obra, com base nos preços dos materiais mais significativos aplicados na obra, à data de início do procedimento de concurso, procedendo-se posteriormente ao cálculo de revisão de preços com base nesta fórmula reajustada, proposta pelo empreiteiro, a que se designa “Cenário 2”. Posteriormente aplica-se a revisão extraordinária de preços, através da proposta da nova fórmula justificada para materiais que representem mais de 3% do valor contratual e cuja taxa de variação homóloga do custo de materiais que seja superior a 20%, procedendo-se à respetiva aplicação do cálculo de revisão de preços, a que se designa “Cenário 3 - Opção B”. O “cenário 3 - Opção A” é uma possibilidade através da majoração dos coeficientes de atualização mensal, mas pouco ajustada a esta obra. Com o estudo, algumas conclusões e recomendações são de explorar nas conclusões.

A obra envolvida no estudo não é considerada abrangida por contratos públicos, mas está sujeita às regras de contratação pública, não podendo ser realizadas descrições mais precisas quanto aos seus detalhes, carecendo de anonimato, com autorização para divulgação dos dados apresentados.

Numa breve descrição, o “Edifício” objeto de estudo, envolve a edificação da estrutura de suporte e remate de coberturas de um edifício existente com 5 pisos, procedendo-se previamente ao desmonte da estrutura interior em madeiras de pavimentos, paredes divisórias e coberturas, aproveitando as paredes exteriores em alvenaria de pedra.

### a) Cenário 1 - convencional sem aplicação do Regime excepcional e temporário de RP

Para este edifício procedeu-se à entrega das propostas em Maio 2021, tendo obra iniciado em Julho 2021 (prazo de 10 meses – final de Abril 2022), acabando por terminar em Junho 2022 (2 meses depois do contratualizado). Esta obra teve como fórmula de Revisão de Preços presente no Caderno de Encargos, uma fórmula que atende à tipologia da obra e dos materiais aplicados (Eq. 2).

$$C(t) = 0,40x \frac{S(t)}{S(o)} + 0,03x \frac{M3(t)}{M3(o)} + 0,04x \frac{M7(t)}{M7(o)} + 0,02x \frac{M14(t)}{M14(o)} + 0,04x \frac{M15(t)}{M15(o)} + 0,04x \frac{M20(t)}{M20(o)} + 0,02x \frac{M31(t)}{M31(o)} + 0,01x \frac{M40(t)}{M40(o)} + 0,04x \frac{M41(t)}{M41(o)} + 0,02x \frac{M43(t)}{M43(o)} + 0,11x \frac{M45(t)}{M45(o)} + 0,06x \frac{M51(t)}{M51(o)} + 0,01x \frac{M56(t)}{M56(o)} + 0,01x \frac{M57(t)}{M57(o)} + 0,05x \frac{E(t)}{E(o)} + 0,10 \quad (2)$$

Nota: M3-inertes; M7- telhas cerâmicas; M14- Rede electrossoldada; M15-chapa de aço galvanizada; M20-cimento em saco; M31- Membrana betuminosa; M40- Caixilharia em alumínio termolacado; M41- Pavimentos aligeirados de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos; M43- Aço para betão armado; M45- Perfilados pesados e ligeiros; M51- Tintas para Construções Metálicas; M56- Sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior (ETIC); M57- Isolamentos térmicos e acústicos.

Esta fórmula foi desenvolvida atendendo às quantidades previstas para a obra e considerando os preços unitários associados a essas quantidades de material e consequentemente determinadas as percentagens de custo desses materiais, com base no preço contratualizado para a obra, determinando-se assim os valores de b (excluindo 10% ao preço contratualizado para consideração da parcela “d” de 0,10). Sabe-se que o empreiteiro adjudicado não propôs junto com a proposta, reajustamento da fórmula apresentada, de acordo com a possibilidade descrita no n.º 1 do artigo 3º do Decreto-lei n.º 6/2004, nomeadamente [17]: “(...) os concorrentes poderão propor outras em alternativa, devidamente justificadas, ainda que o programa de concurso não admita expressamente propostas condicionadas ou variantes”. A obra foi adjudicada por 741.697,1€, com o seguinte plano de pagamentos proposto pelo empreiteiro em fase de concurso, tabela 2.

Tabela 2: Valores mensais e acumulados do Plano de Pagamentos contratualizado

Meses	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Plano Pagamentos €	49.767,6	68.725,0	81.909,8	95.334,0	103.758,3	78.485,5	80.334,0	75.334,0	59.767,6	48.281,2
Valor acumulado €	49.767,6	118.492,6	200.402,4	295.736,4	399.494,7	477.980,2	558.314,3	633.648,3	693.415,9	741.697,1

No 4º mês, o empreiteiro solicitou prorrogação de prazo, alegando atrasos na entrega de materiais, situação não considerada pelo Dono de Obra por não se justificar o argumento, apresentando, no entanto, foi apresentado um plano de pagamentos reajustado. Foi concedida a prorrogação de prazo de 2 meses (término em Junho 2022), mas não de forma graciosa, não se aplicando multas contratuais, pelo que não foi atendido o disposto no artigo 13º do Decreto-lei n.º 6/2004 em favor do empreiteiro [16]. Aplicando revisão de preços com base nos índices ponderados de custos de mão-de-obra, materiais e equipamentos de apoio, publicados para os meses de intervenção em obra, nos anos 2021 e 2022, através dos seguintes documentos: Assim os resultados provenientes do cálculo dos coeficientes de atualização atendendo ao Plano de Pagamentos (artigo 4º do DL 6/2004) para os meses decorrentes do prazo contratual, descrito na tabela 3. Com o resultado da revisão de preços, a obra tem um custo total de 796.950,23€, cerca de 7,4% acima do valor contratualizado.

Tabela 3: Montante de Revisão de Preços aplicado ao Plano de Pagamentos contratualizado

	jul/21	ago/21	set/21	out/21	nov/21	dez/21	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	Σ
CAM	1,040153	1,045096	1,044284	1,051702	1,054817	1,055922	1,083384	1,092116	1,142558	1,193948	-
PP (€)	49.767,6	68.725,0	81.909,8	95.334,0	103.758,3	78.485,5	80.334,0	75.334,0	59.767,6	48.281,2	741.697,13€
MRP (€)	1.998,3€	3.099,2€	3.627,3€	4.929,0€	5.687,7€	4.389,1€	6.698,6€	6.939,5€	8.520,4€	9.364,1€	55.253,1€

NOTAS: CAM-Coefficiente de Atualização Mensal; PP-Plano de Pagamentos; MRP-Montante de Revisão de Preços

### b) Cenário 2 - com aplicação do Regime excecional e temporário de revisão de preços

Nesta obra aplica-se o n.º 1 do artigo 2º do Decreto-lei n.º 36/2022, transcrevendo-se [7]: “O presente Decreto-lei é aplicável aos contratos públicos, em execução ou a celebrar, e aos procedimentos de formação de contratos públicos iniciados ou a iniciar”.

Para aplicação da Revisão extraordinária de Preços, o empreiteiro tem solicitar um pedido de revisão extraordinária de preços, é necessário que exista elegibilidade com base no disposto no n.º 1 do artigo 3º do Decreto-lei n.º 36/2022, transcrevendo-se [7]: “a) Represente, ou venha a representar durante a execução, pelo menos 3 % do preço contratual; e b) A taxa de variação homóloga do custo seja igual ou superior a 20%”. Aplicando a referida alínea a) do n.º 1 do artigo 3º, conforme acima descrito, é necessário perceber quais os materiais que cumprem o requisito de representarem mais de 3% do valor contratual. O quadro seguinte, apresentado pelo empreiteiro, contempla as quantidades transpostas a partir dos mapas de medições da obra aferidos do preço unitário desse material, e neste caso à data de 30 maio 2022. Assim, os materiais “inertes para betão” (M03), “chapa colaborante” (M15), “cimento em saco” (M20), “pavimentos aligeirados de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos” (M41), “aço em varão” (M43), “perfis metálicos” (M45) e “tintas para construções metálicas” (M51), têm representação em percentagem igual ou superior a 3% face ao valor do preço contratualizado (zona sombreado), tabela 4.

Tabela 4: Cálculo que cada material de obra representa face ao valor contratual

	Quantidade	Unidade	Preço unit. (€)	Preço total	% Preço contratual	Código RP
Cobertura (godo)	25	m2	15	375,0€	0,00	M01
Inertes p/ betão	620	m3	35	21.700,0€	0,03	M03
Telha	620	m2	20	12.400,0€	0,02	M07
Beirais	110	ml	40	4.400,0€	0,01	M07
Alvenaria	204	m2	16	3.264,0€	0,01	M08
Rede electrossoldada	3250,0	m2	5	16.250,0€	0,02	M14
Chapa colaborante	1476	m2	25	16.250,0€	0,06	M15
Cimento saco	8680	un	3	26.040,0€	0,04	M20
Impermeabilizações	350	m2	45	15.750,0€	0,02	M31
Caixilharia alumínio	22	un	400	8.800,0€	0,01	M40
Laje aligeirada	650	m2	25	16.250,0€	0,02	M41
Aço varão	17620,3	kg	1,2	21.144,3€	0,03	M43
Perfis metálicos	83635,9	kg	1,2	100.363€	0,15	M45
Pinturas	2650	m2	17,5	46.375€	0,07	M51
Etic	180	m2	50	9.000,0€	0,01	M56
Isolamento térmico	600	m2	15	9.000,0€	0,01	M57

O empreiteiro aplicou posteriormente a referida alínea b) do n.º 1 do artigo 3º, onde perante os materiais com percentagem igual ou superior a 3% do preço contratual, procedeu ao cálculo da taxa de variação homóloga de custo atendendo aos meses de decurso da obra, com base no prazo contratual (10 meses com início em julho 2021). Na fórmula da taxa de variação homóloga do custo procedeu ao respetivo cálculo utilizando os índices dos custos dos materiais mais significativos considerando o mês em causa comparativamente com o índice desse mês no ano anterior, de acordo com a expressão seguinte, e aplicando o exemplo de cálculo para o material M3 considerando julho 2021 com julho 2020 respetivamente (eq.º3).

$$TxVH_{jul2021-jul2020} = \left( \frac{M03_t}{M03_{t-12}} - 1 \right) \times 100; \text{ exemplo: } TxVH = \left( \frac{M03_{jul2021}}{M03_{jul2020}} - 1 \right) \times 100 = \left( \frac{107,7}{101,7} - 1 \right) \times 100 = 5,9\% \quad (3)$$

A tabela 5 contempla o cálculo das taxas de variação Homóloga de custos de mão-de-obra, materiais (03, 15, 20, 41, 43, 45 e 51), e equipamentos, calculados no período contratual.

Tabela 5: Cálculo da taxa de variação homologa no prazo contratual dos materiais mais significativo em obra

	tx Homol julho 2021- 2020	tx Homol agosto 2021-2020	tx Homol set 2021- 2020	tx Homol out 2021- 2020	tx Homol nov 2021- 2020	tx Homol dez 2021- 2020	tx Homol jan 2022- 2021	tx Homol fev 2022- 2021	tx Homol mar 2022- 2021	tx Homol abril 2022- 2021	tx Homol maio 2022- 2021
MO	5,87%	6,24%	7,00%	8,78%	8,95%	8,96%	9,33%	14,84%	17,58%	21,29%	16,79%
M03	5,90%	7,00%	6,49%	4,90%	6,17%	7,06%	8,50%	12,17%	10,44%	16,20%	15,82%
M15	44,36%	45,46%	44,56%	43,88%	42,99%	32,58%	22,13%	20,73%	24,40%	21,00%	9,34%
M20	2,34%	2,77%	3,48%	3,52%	4,26%	4,33%	3,44%	1,68%	2,54%	16,84%	17,27%
M41	7,81%	8,28%	11,29%	13,76%	13,39%	12,93%	14,31%	12,40%	19,93%	24,62%	27,91%
M43	59,20%	52,29%	48,61%	53,60%	51,22%	35,19%	28,27%	28,08%	65,31%	80,41%	51,08%
M45	50,48%	54,78%	54,30%	52,68%	53,81%	46,94%	27,59%	25,34%	39,48%	47,65%	32,57%
M51	5,73%	5,88%	5,48%	6,16%	8,72%	7,75%	7,98%	10,38%	25,83%	24,98%	23,79%
Eq	3,44%	3,60%	3,85%	4,18%	4,69%	5,01%	5,33%	5,47%	6,12%	6,59%	7,14%

NOTAS: MO – Mão de Obra; M\* - Material \* que representa pelo menos 3% do valor contratual; Eq - Equipamentos

A análise deste quadro permite concluir que a taxa de variação homologa de custo para os materiais M43 (Aço para betão armado) e M45 (Perfilados pesados e ligeiros) está sempre acima de 20% para os meses descritos. O material M43 apresentou um pico de taxa homologa de variação em abril 2022-2021 de 80,41% e no mês transato de 65,31% respetivamente. O material M15 (Chapa de aço galvanizada) está acima de 20% na comparação julho 2021-2022 a abril 2021-2022, tendo esta vindo a descer. Já os materiais M41 (pavimentos aligeirados de vigotas pré-esforçadas e blocos cerâmicos) e M51 (Tintas para Construções Metálicas) apresentam taxa homologa acima de 20% nos últimos 3 meses, o que é indicador de consecutiva subida de preço. Os restantes materiais descritos, não têm taxa homologa acima de 20%, mas denota-se por comparação entre os diversos meses, que as mesmas estão a aumentar, o que poderá ser um sinal de a curto prazo poderem estar acima da percentagem dos 20%. Relativamente à taxa de variação homologa de mão-de-obra e de equipamentos para os meses comparados, apenas a mão-de-obra teve a referida taxa acima de 20% no mês de Abril 2022-2021, o que se considera sazonal. Esta situação que aconteceu enquanto valor mais elevado, também para esse mês em quase todos os materiais, conforme já descrito, situação justificada em parte pela reação dos mercados ao conflito entre Rússia e Ucrânia e consequente subida de preços, de inflação em bens e serviços.

Perante este cenário, esta obra está enquadrada na revisão extraordinária de preços, pois cumpre com o disposto n.º 1 do artigo 3º do Decreto-lei n.º 36/2022 [7]. Neste sentido, o empreiteiro, no seu pedido de revisão extraordinária de preços, apresentou nova fórmula de revisão de preços, uma vez que a obra ainda estava a decorrer, nomeadamente atendendo às alíneas a) e b) do n.º 2 do artigo 3º do Decreto-lei n.º 36/2022, e com base no prazo estabelecido no artigo 8º do mesmo diploma legal. A justificação tem enquadramento nas alíneas a) e b) do n.º 1 do artigo 3º do DL 36/2022, onde há pelo menos um material que representa mais de 3% do valor da obra e tem taxa de variação homologa de custo superiores a 20%. A justificação descrevia ainda que a fórmula presente em Caderno de Encargos não atende da forma mais correta com as percentagens efetivas de materiais perante o atual cenário de subida de preços, apresentando nova fórmula para a revisão de preços reajustada (eq.º4), situação analisada dentro dos 20 dias (n.º 3 do art.3º do Decreto-lei n.º 36/2022).

$$\begin{aligned}
 C(t) = & 0,36 \times \frac{S(t)}{S(o)} + 0,03 \times \frac{M3(t)}{M3(o)} + 0,03 \times \frac{M7(t)}{M7(o)} + 0,02 \times \frac{M14(t)}{M14(o)} + 0,06 \times \frac{M15(t)}{M15(o)} + 0,04 \times \frac{M20(t)}{M20(o)} + 0,02 \times \frac{M31(t)}{M31(o)} \\
 & + 0,01 \times \frac{M40(t)}{M40(o)} + 0,02 \times \frac{M41(t)}{M41(o)} + 0,03 \times \frac{M43(t)}{M43(o)} + 0,15 \times \frac{M45(t)}{M45(o)} + 0,07 \times \frac{M51(t)}{M51(o)} + 0,01 \times \frac{M56(t)}{M56(o)} \\
 & + 0,01 \times \frac{M57(t)}{M57(o)} + 0,04 \times \frac{E(t)}{E(o)} + 0,10
 \end{aligned} \tag{4}$$

Perante ainda sobre a aplicação do “Regime excecional de revisão de preços”, o empreiteiro solicitou prorrogação de prazo ao abrigo do n.º 1 do artigo 4º, nomeadamente a “impossibilidade de o empreiteiro obter materiais necessários para a execução da obra, por motivos que comprovadamente não lhe sejam imputáveis” [7], facto que já se verificava em obra na entrega de

telhões de beiral dadas como esgotadas da marca selecionada. O empreiteiro, apresentou junto com o pedido o novo “*plano de pagamentos reajustado*” (n.º 2 do artigo 4º), que efetivamente foi o plano real de pagamentos. O Dono de Obra na sua análise ao abrigo do n.º 3 do artigo 3 do Decreto-lei n.º 36/2022, não aceitou o pedido de prorrogação de prazo, uma vez que no mês 4 o empreiteiro já estava atrasado sem se provar o fundamento, alegando-se má gestão de obra e que foi dada prorrogação de 2 meses graciosa, aplicando-se para efeito de revisão de preço o Plano de pagamentos contratualizado e a revisão de preços convencional. Nesta data, o pedido de prorrogação vem com base nesse atraso para poder enquadrar a revisão extraordinária de preço, embora sem fundamento justificável, pois os materiais objeto da justificação no 4º mês eram diferentes do atual pedido de prorrogação, e os materiais enquadráveis no âmbito da revisão foram previstos e aplicados antes da subida descontrolada desses preços, não tendo, portanto, fundamento.

Assim, não foi aplicada a revisão extraordinária de preços, nem outra forma de reposição do equilíbrio financeiro do contrato, mas neste artigo procedeu-se ao cálculo do montante de revisão de preços com base no plano de plano de pagamentos reajustado, considerando ainda a fórmula de revisão de preços reajustada pelo empreiteiro, para efeitos de estudo nesta possível modalidade.

Aplicando a nova fórmula de revisão de preços revista, e com base no “*Plano de pagamentos reajustado*”, o montante total a rever seria de 78.147€, tabela 6.

Tabela 6: Cálculo do Montante de Revisão de Preços Reajustado com base no Plano de Pagamentos Reajustado

	jul/21	ago/21	set/21	out/21	nov/21	dez/21	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	mai/22	jun/22	Σ
CAM	1,050947	1,057111	1,055713	1,061964	1,065457	1,065936	1,092539	1,100364	1,160417	1,210707	1,203207	1,183045	-
PPR	32.292,00	46.790	58.338	71.692,1	78.158,32	79.545,8	81.757,05	80.665,2	58.945,3	52.814,2	54.455,6	46243,5	741.697,13€
MRPR	1.645,2€	2.672,2€	3.250,2€	4.442,3€	5.116,0€	5.244,9€	7.565,7€	8.095,9€	9.455,8€	11.128,3€	11.065,8€	8.464,6€	78.147€

NOTAS: CAM-Coeficiente de Atualização Mensal; PPR-Plano de Pagamentos Reajustado; MRPR-Montante de Revisão de Preços face ao Plano de Pagamentos Reajustado

No entanto, a título comparativo, caso a revisão de preços pela nova fórmula fosse aplicada ao Plano de pagamentos contratualizado, o valor total a rever seria de 63.653,7€, ou seja 8.400,1€ acima do considerado pela aplicação da fórmula de revisão de preços e plano de pagamentos contratualizados. No entanto, caso o Dono de Obra tivesse considerado a aceitação da proposta do empreiteiro com enquadramento no “*Regime excepcional e temporário*” de revisão de preços, o montante a rever seria 22.893,9€ acima do considerado efetivamente (78.147€-55.253,1€). E ainda, a obra teria um custo total de 819.844,13€, cerca de 10% acima do preço contratualizado.

### c) Cenário 3 - outras possibilidades previstas no Regime excepcional e temporário de RP

Perante os cenários apresentados e solucionados para a obra (consideração do cenário 1 em a), importa ainda perceber se, neste caso, o empreiteiro, independentemente da razão dos argumentos apresentados e não aceites pelo Dono de Obra, se ficou prejudicado nesta obra, face à subida descontrolada de preços dos materiais. Ou seja, o Dono de Obra não aceitou a nova fórmula de revisão de preços proposta pelo empreiteiro (eq.º4), nem aceitou a prorrogação de prazo, e consequentemente a não aplicação do Plano de Pagamentos Reajustado e da fórmula de revisão de preços reajustada (eq.º4), face a não aceitar os atrasos como inerentes de enquadramento do âmbito do regime citado. No entanto estudam-se seguidamente, para efeitos de comparação, outras soluções, enquadráveis com base no n.º 3 do artigo 3º do Decreto-lei 36/2022, nomeadamente [7]:

“a) Apresentar, de forma devidamente fundamentada, uma contraproposta;

b) Realizar a revisão de preços segundo a forma contratualmente estabelecida, sendo, para os casos de revisão por fórmula, os coeficientes de atualização (Ct) resultantes dos respetivos cálculos multiplicados por um fator de compensação de 1,1;

c) Incluir determinados materiais e mão de obra com revisão calculada pelo método de garantia de custos, aplicando -se aos restantes a fórmula constante do contrato, sem qualquer majoração.”

Seguidamente são analisadas as opções das alíneas b) e c) acima citadas, considerando-se as mais expressivas para o estudo, não se abordando a alínea a), por motivos de ser suficiente aplicar ligeiros reajustes nos índices da fórmula de revisão de preços, o que à partida terá menor impacto que o conteúdo de qualquer uma das outras alíneas objeto do estudo.

### Opção A – majoração de Ct com o fator 1,1

Nesta opção é possível aplicar a majoração 1,1 ao Coeficiente de atualização mensal, que de acordo com os cálculos elaborado na tabela 3 e tendo por base o Plano de Pagamentos contratualizado inicialmente, obtendo-se os seguintes resultados, tabela 7.

Tabela 7: Montante de Revisão de Preços com coeficiente de atualização mensal de 1,1

	jul/21	ago/21	set/21	out/21	nov/21	dez/21	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	Σ
CAM	1,040153	1,045096	1,044284	1,051702	1,054817	1,055922	1,083384	1,092116	1,142558	1,193948	
CAMx1.1	1,144168	1,149605	1,148712	1,156873	1,160299	1,161514	1,191722	1,201328	1,256814	1,313343	
PP	49.767,6	68.725,0	81.909,8	95.334,0	103.758,3	78.485,5	80.334,0	75.334,0	59.767,6	48.281,2	741.697,13€
MRP1.1	7.174,9€	10.281,6€	12.181,0€	14.955,3€	16.632,3€	12.676,5€	15401,8€	15.166,9€	15.349,2€	15.128,6€	134.948,1€

NOTAS: CAM-Coeficiente de Atualização Mensal; PP-Plano de Pagamentos; MRP1.1-Montante de Revisão de Preços face a atualização 1.1 ao coeficiente de atualização mensal.

O valor de cálculo do montante de revisão de preços é de 134.948,1€, utilizando o coeficiente de majoração 1,1, que representaria quase 20% acima do valor contratual.

Salienta-se, no entanto, que esta opção prevista na legislação parece ser algo majorada, o que poderá ter correta aplicação em obras muito específicas em que se desconheçam o índice dos custos de materiais aplicados, ou onde existem muitos materiais com taxa de variação homologa muito acima de 20% nos meses de aplicação, ou em casos significativos de expressiva quantidade de um material com taxa de variação homologa considerável. Não se descarta também a situação deste coeficiente de majoração ser suficiente para abranger eventuais subidas de custos não considerados nas fórmulas de revisão de preços, mas existentes nas obras (materiais abaixo de 1%), ou ainda para situações de pressões próprias da gestão de obra. No entanto, em situações normais o resultado do montante de revisão de preços é muito acima do que é um valor expectável para a obra, mesmo em época de muita inflação.

### Opção B – aplicar garantia de custos a alguns materiais e FRP aos restantes (regime misto)

Situação de aplicação de Revisão de preços por fórmula para a generalidade dos materiais/mão-de-obra-equipamentos e garantia de custos para aqueles que se tenha demonstrado terem sido afetados. Assim para a aplicação desta opção de cálculo importa saber que materiais se vão aplicar para cálculo da garantia de custos, onde através da tabela 5 (cálculo da taxa de variação homologa), decide-se pelos materiais que têm maior impacto nesta variável, considerando-se os materiais b15, b43 e b45 (valores acima de 20% em todos os meses analisados, com exceção de b15 que não atinge 20% no último mês). Posteriormente foi necessário retirar do cronograma de trabalhos de cada mês, a quantidade de trabalhos afetos a b15, b43 e b45 respetivamente, e aplicar a esses materiais os preços unitários desses materiais, com base no custo unitário dos mesmos no mês anterior ao da entrega da proposta (abril 2021), de modo a perceber-se o montante monetário a retirar em cada mês ao plano de pagamentos contratualizado (tabela 8).

Tabela 8: Quantidade de materiais significativos e respetivo custo a retirar ao plano de pagamentos inicial

Mat.	un	set/21			out/21			nov/21			dez/21			jan/22			fev/22			
		Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	
b15	m2							492	20	9.840	492	20	9.840	492	20	9.840				
b43	kg	9.799,1	1	9.799,1	1.708,00	1,00	1.708	1.754,2	1	1.754,2	1.754,2	1	1.754,2	1.754,2	1	1.754,2	850,6	1	850,6	
b45	kg				46367	0,9	41.730	10.731	0,9	9.658	10.731	0,9	9.658	10.731	0,9	9.658	5.076	0,9	4.568,4	
Totais				9.799,1			43.438			21.252			21.252			21.252			5.419	122.412,6

Posteriormente a fórmula de RP do contrato terá de ser ajustada, retirando os materiais b15, b43 e b45, e redistribuindo de modo proporcional a soma das suas percentagens em b pelos restantes fatores da fórmula (mão-de-obra, materiais e equipamentos), ficando a fórmula reajustada (eq.º5).

$$C(t) = 0,49 \times \frac{S(t)}{S(o)} + 0,04x \frac{M3(t)}{M3(o)} + 0,05x \frac{M7(t)}{M7(o)} + 0,03x \frac{M14(t)}{M14(o)} + 0,05x \frac{M20(t)}{M20(o)} + 0,03x \frac{M31(t)}{M31(o)} + 0,01x \frac{M40(t)}{M40(o)} + 0,05x \frac{M41(t)}{M41(o)} + 0,07x \frac{M51(t)}{M51(o)} + 0,01x \frac{M56(t)}{M56(o)} + 0,01x \frac{M57(t)}{M57(o)} + 0,06 \times \frac{E(t)}{E(o)} + 0,10 \quad (5)$$

Aplicando a nova fórmula de revisão de preços descontando ao Plano de Pagamentos o valor das quantidades de materiais retirados na fórmula de revisão de preços (tabela 8), resultando num Plano de Pagamentos Corrigido com respetivos Montante de Revisão de Preços ajustados, tabela 9.

Tabela 9: Cálculo montante de revisão de preços com fórmula reajustada (sem materiais significativos)

	jul/21	ago/21	set/21	out/21	nov/21	dez/21	jan/22	fev/22	mar/22	abr/22	Σ
CAM	1,014152	1,015640	1,015549	1,025171	1,028460	1,030412	1,057905	1,067333	1,097051	1,145238	
PPI	49.767,6	68.725,0	81.909,8	95.334,0	103.758,3	78.485,5	80.334,0	75.334,0	59.767,6	48.281,2	741.697,13€
TR	-	-	9.799,1	43.438	21.252	21.252	21.252	5.419	-	-	122.412,6
PPC	49.767,6€	68.725,0€	72.110,7€	51.896,0€	82.506,3€	57.233,5€	59.082,0€	69.915,0€	59.767,6€	48.281,2€	619.285,0€
MRP	704,3€	1.074,9€	1.121,2€	1.306,3€	2.348,2€	1.740,6€	3.421,1€	4.707,6€	5.800,5€	7.012,3€	29.236,9€

NOTA: CAM – Coeficiente de Atualização Mensal; PPI – Plano de Pagamentos Inicial; TR – Trabalhos a Retirar; PPC – Plano de Pagamentos Corrigido; MRP – Montante de Revisão de Preços

Seguidamente procedendo-se ao cálculo por garantia de custos, atendendo à situação de preços reais para os materiais b15, b43 e b45, com preços reais aos meses de aplicação, aplicando-se as quantidades expressas na tabela 8, mas com os preços unitários reais, obtendo-se tabela 10.

Tabela 10: Quantidade de materiais significativos e custos reais no mês de cálculo enquanto garantia de custo

Mat.	un	set/21			out/21			nov/21			dez/21			jan/22			fev/22			
		Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	Quant	Pun	Valor	
b15	m2							492	25	12.300	492	25		492	24,5	12.054				
b43	kg	9.799,1	1,1	10.779	1.708,0	1,15	1.964,2	1.754,2	1,15	2.017,3	1.754,2	1,15	20.17,3	1.754,2	1,25	2.192,8	850,6	1,25	1.063,3	
b45	kg				46,367	1,10	51.003	10.731	1,1	11.804		1,10	11.804	10.731	1,2	12.877	5076	1,2	6.091,2	
Totais				10.779			52.967			26.122			26.122			27.124			7.154,5	150.268,1

Nota: Preços fornecidos por empresas, a preços de venda convencionais com alguma margem de desconto comercial

Ora obtendo-se a diferença entre resultado calculado com preços unitários reais (tabela 10) com o calculado com preços unitários à data de apresentação da proposta (abril 2021 – tabela 8), obtém-se o excedente de custo com estes materiais e que simbolizam o equivalente à margem de inflação dos mesmos (atualização de preços dos materiais por garantia de custos), obtendo-se 27.855,5€ (150.268,1€-122.412,6€). Calculando este resultado com o resultado da revisão de preços descrito na tabela 9 (29.236,9€), obtém-se o montante de 57.092,4€, valor que seria a compensação ao empreiteiro realizando a situação mista de fórmula de revisão de preços, conforme descrito, considerando assim o impacto da variação de preço desses materiais.

#### d) Resumo e comparações entre os diferentes cenários estudados

Após realização dos cálculos com as diferentes possibilidades, discutem-se resultados, tabela 11.

Tabela 11: Quadro resumo com os cenários estudados

Cenário	Descrição	MRP
1	Cálculo normal sem aplicação do regime excecional e temporário de RP.	55.253,1€
2	Aplicação do regime excecional de RP, envolvendo Plano de pagamentos Reajustado (3 materiais com mais de 3% do valor contratual e taxa de variação homologa acima de 20%).	78.147€
3-Opção A	Aplicação da majoração 1,1 ao Coeficiente de Atualização Mensal	134.948,1€
3-Opção B	Fórmula RP reajustada e Aplicação de garantia de custos aos materiais mais significativos	57.092,4€

De modo geral, o cenário 3-Opção B (57.092,4€) é aquele que à partida se assemelha mais à situação real da inflação dos materiais mais significativos para a obra, pois contempla cálculo dos materiais significativo com base em garantia de custos (custos reais) da quantidade utilizadas e nos meses de aplicação, e por outro lado fórmula de revisão de preços reajustada sem considerar esses materiais significativos. Ora este resultado não difere muito da situação de preços normal ou convencional (55.253,1€ - Cenário 1). A situação de majoração dos coeficientes de atualização mensal em 1,1 parecem desproporcionais aos valores reais desta obra, mas se tendo justificado a perspetiva dos autores. O cenário B, apresentado pelo empreiteiro e não aceite pelo Dono de Obra, por motivos descritos, contempla uma situação real da obra, mas que diverge do Plano de pagamentos inicial, o que é frequente, mas indesejável na gestão de obra, resultando em prejuízos.

## Principais conclusões

Este artigo permite analisar o disposto no Decreto-lei n.º 36/2022 [7], e com base numa obra real com materiais expressivos que foram objeto de subida descontrolada de preço. Problema é levantado muito vezes pelas fórmulas de revisão de preços serem genéricas e desajustadas à tipologia de obra, mas podendo ser alvo de reajuste em fase de concurso. Estas fórmulas contemplam como que uma média de aplicação todos os meses, podendo em alguns meses de aplicação até existirem prejuízos com alguns materiais, mas noutros meses há vantagens económicas com esses mesmos materiais, mesmo não sendo aplicados nesses meses.

Este artigo vem provar a necessidade de se cumprir, ou pelo menos o mais possível, o Plano de Pagamentos contratualizado, atendendo à tipologia dos trabalhos descritos. Atrasos podem trazer consideráveis prejuízos para o empreiteiro caso as prorrogações de prazos não serem aceites, mesmo que justificadas, podem resultar de problemas de gestão e não do frequente projeto. Assim, o “cenário 2” vai no sentido da ótica do empreiteiro e de alguma majoração à situação real da obra (montante de 78.147€), cuja gestão tem de se ajustar ao que se propõe fazer em fase de concurso.

Considerando o “cenário 3 - Opção A” e conforme já referido, considera a majoração de 1,1 aos coeficientes de atualização mensal é 1,1, sendo desproporcional para esta obra, mas possível e aplicável em obras com especificidades muito próprias, mas ficando a ressalva na sua utilização.

O “cenário 3 - Opção B” demonstra ser o mais realista, baseando-se no cálculo por garantia de custos com os materiais mais significativos e com base nos custos unitários reais nos meses de aplicação (acréscimo de 27.855,5€ face ao preço contratual desses materiais), e aplicação de fórmula de revisão de preços reajustada aos restantes materiais (montante de 29.236,9€). O total de compensação ao empreiteiro segundo este cenário é de 57.092,4€, que se compararmos com o “cenário 1”, dito convencional e sem aplicação do “Regime excepcional e temporário” de Revisão de Preços, o resultado é de 55.253,1€, o que perfaz diferença de apenas 3% entre estes cenários (1839,3€), e que no preço contratual da obra cerca de 0,24% apenas, o que é pouco expressivo neste caso. Considera-se importante a revisão de preços enquanto mecanismo dito “extraordinário”, aplicando o Regime publicado [7], mas cuja análise carece de devida ponderação para não existir desperdício económico baseado em argumentos que podem ser resultantes de problemas de gestão. No entanto é importante um método de revisão de preços desenvolvido e ajustado à tipologia da obra e com um Plano de Pagamento exequível e realista, carecendo toda a gestão de stocks da obra numa vertente a não descurar, logo desde a fase de concurso, o que em muitos casos não sucede.

## Referências

- [1] Khudaykulova, M.; Yuanqiong, H.; Khudaykulov, A., *Economic Consequences and Implications of the Ukraine-Russia War*, International Journal of Management Science and Business Administration, (2022) Vol. 8, Issue 4.
- [2] Ruiz Estrada, Mario Arturo., *How Much Inflation and Unemployment Worldwide Can Generate the Russo-Ukrainian War Crisis?* (2022), Available at <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4131388>.
- [3] M. Prichett, P. Griesmyer, D. McDonald, V. Venters, L. Dysert., *AACE international certified cost technician primer*, AACE International Inc., 2011.
- [4] Muhammad Ali Musarat, Wesam Salah Alaloul, M.S., Liew, *Impact of inflation rate on construction projects budget: A review*, Ain Shams Engineering Journal, (2021) Vol. 12, Issue 1.
- [5] Salerno, D., *ESG Criteria in Alternative Investments. In: The Evolution of Sustainable Investments and Finance*. Palgrave Macmillan, Cham, 2021.
- [6] Orhan, Ebru., *The effects of the Russia-Ukraine war on global trade*. Journal of International Trade, Logistics and Law, Vol. 8, Num. 1, (2022) 141-146.

- [7] Decreto-lei n.º 36/2022 de 20 de maio, DR n.º 98 – série I. Presidência do Conselho de Ministros. Lisboa
- [8] Instituto Nacional de Estatística. ESTATÍSTICAS DE PREÇOS DA HABITAÇÃO AO NÍVEL LOCAL – 1º trimestre de 2022; Informação à Comunicação Social, 14 julho 2022.
- [9] Instituto Nacional de Estatística; ÍNDICES DE PRODUÇÃO, EMPREGO E REMUNERAÇÕES NA CONSTRUÇÃO - Junho 2022. Informação à Comunicação Social, 9 agosto 2022.
- [10] Eurostat – Estatísticas Europeias, [https://ec.europa.eu/info/departments/eurostat-european-statistics\\_pt](https://ec.europa.eu/info/departments/eurostat-european-statistics_pt), em 5 de setembro de 2022.
- [11] Decreto-lei 6/2004 de 6 de janeiro, DR n.º 4 – série I. Min. das Obras Públicas, Transportes e Habitação. Lisboa.
- [12] Lei 1578 de 10 abril 1924, Diário do Governo n.º 79- série I. Min. do Comércio e Comunicações. Lisboa.
- [13] Decreto-Lei n.º 47945 de 16 de setembro, Diário do Governo n.º 217-série I. Min. das Obras Públicas. Lisboa.
- [14] Decreto-lei n.º 273-B/75, de 3 de junho, DR n.º 127- Série I. Min. do Equip. Social e do Ambiente. Lisboa
- [15] Decreto-lei n.º 99/88, de 23 de março, DR n.º 69 – série I. Min. das Obras Públicas, Transportes e Comunicações.
- [16] Decreto-lei 18/2008 de 29 de janeiro, DR n.º 20 – série I. Min. das Obras Públicas, Transportes e Comunicações.
- [17] Decreto-Lei n.º 73/2021 de 18 de agosto, DR n.º 160 – série I. Presidência do Conselho de Ministros. Lisboa.

## Methodologies for estimating the built environment stock: an overview

LOPES Jorge<sup>1, a</sup>, OLIVEIRA Rui<sup>1, b</sup> and ABREU Maria I.<sup>1, c</sup>

<sup>1</sup> Campus de Santa Apolónia, 5300-253, Bragança, Portugal

<sup>a</sup>lopes@ipb.pt, <sup>b</sup>roliveira@ipb.pt, <sup>c</sup>isabreu@ipb.pt

**Keywords:** Built Capital Stock; Construction Sector; Construction Investment; National Accounts; Perpetual Inventory Method.

**Abstract.** The role of the construction sector in the process of economic growth and development is well recognized in the literature. However, in the most advanced industrial economies, as well as emerging economies, the construction industry is no longer focused on providing a single service, i.e., a building or physical infrastructure, but on a variety of services and improvement of human and natural environments. Built capital stock is a major component of any country's produced fixed capital as designated in the System of National Accounts (SNA) of the United Nations. According to several writers, the knowledge of reliable data of building and other construction assets of a specific country or region is a crucial element for the long-term management of these assets. This paper presents an overview of the Perpetual Inventory Method (PIM) used for estimating capital stock and some methodologic issues regarding the measures of construction investment and of built capital stock. Additionally, based on the results of an earlier work, estimates of the Cape Verde's built capital stock for the year 2014 are presented. The level of the of the built capital stock of a specific country and its impact on the development pattern of the construction industry is a suggestion for further studies.

### Introduction

Built capital stock is a major component of any country's produced fixed capital assets as designated in the System of National Accounts (SNA) of the United Nations (United Nations, 2008a). Building and other construction assets constitute a significant part of a country's physical and economic infrastructure. The construction industry (indeed, building and infrastructure development) plays a key role into production and wealth generation. The economic impact can be transformative, especially at lower levels of income per capita (OECD, 2013). As pointed out by Maddison (1987, 2006), the close association between physical capital and different measures of national economy is one of the reasons why physical infrastructure has been considered a powerful engine of economic growth and development. However, in the most advanced industrial economies, as well as emerging economies, the construction industry is no longer focused on providing a single service, i.e., a building or physical infrastructure, but on a variety of services and improvement of human and natural environments (Carassus et al, 2006). The pursuit of sustainable development should accommodate a balance between physical capital, natural capital, and human capital, depending on the circumstances of the country.

Thus, another approach for assessing the performance of an economy besides the measurement of its national output in a given period is accounting for its capital wealth. This approach stresses the importance of preserving a portfolio of capital assets to ensure that an economy's productive base can be maintained (Ruddock et al, 2019). The production of new buildings and other structures in any given period adds to a nation's economic wealth, in the form of the built environment contributing to and complementing its productive and social capital.

Within the context of national accounting, there are two types of physical capital measures, each reflecting a different role of physical capital. The first type of measure looks at capital in its function as a provider of services in production. The second type of capital measure captures its role as a store of wealth. Its aggregate is the net capital stock (also known as wealth stock) that captures

the market value of capital goods. Most modern works, both at national and international levels, that publish capital stock statistics (for instance, Luiss Lab of European Economics, 2021; Inklaar and Timmer, 2015; Derbyshire et al., 2013) are based on the Perpetual Inventory Method (PIM) outlined in the two editions of the OECD Manual- Measuring Capital (OECD, 2001, 2009).

The remaining of the paper is structured as follows: the next section presents the main databases that provides fixed capital statistics and discusses the measures of construction investment and built capital stock; the third section presents an overview of the PIM methodology for estimating capital stock; the fourth section presents the estimates of the built capital stock in Cape Verde. Most of the results and analyses presented in this section are drawn from an earlier work (Lopes et al, 2019) and; a concluding remark finalises the analysis presented in the study.

### **Data sources and measures of construction investment and built capital stock**

Investment in building and other construction structures is a component of gross fixed capital formation (GFCF) as described in the SNA of the United Nations. According to the SNA 2008, GFCF consists of the purchase of goods (and services) that are used in production for more than one year. This publication classifies capital stock statistics according to: type of assets; institutional sectors; and economic sectors as described in the International Standard Classification of Economic Activities (ISIC revision 4) (United Nations, 2008b). The SNA of the United Nations identifies five institutional sectors: households; non-financial corporations; financial corporations; non-profit institutions serving households (NPISH) and; general government. In terms of type of assets, the built capital stock is comprised of: dwellings; and other buildings and structures (including land improvements). It is worth noting that and major improvement to dwellings and other building and structures are also accounted for as built assets. Other fixed assets which are recognised in both the European System of Accounts (ESA, 2010) and SNA 2008 are: machinery and equipment and weapon systems; cultivate biological resources and; intellectual property products (Table 1). Capital stock of an economy is the accumulation through time of these assets. This indicator can be expressed as gross capital stock (which does not take depreciation of assets into account) or net capital stock (which takes depreciation into account), which is part of an economy's balance sheet in the context of income and wealth accounting.

The two most important databases that provide capital statistics are The Pen World Tables (PWT) (Inklaar and Timmer, 2015) and EUKLEMS & INTANProd (Luiss Lab of European Economics, 2021).

The PWT version 10.0 is a database with information on relative levels of income, output, input and productivity, covering 183 countries between 1950 and 2019. The 'Main' file provides data on the expenditure-side gross domestic Product (GDP) at current and chain -linked purchasing power parities (PPPs), output-side GDP at current and chain-linked PPPs, and total net capital stock at current and chain-linked PPPs. These data are presented in million 2017 US\$. The national account-based variables provide real GDP at constant 2017 national prices (in million 2017US\$) and total net capital stock at constant 2017 national prices (in million 2017US\$). The Capital file of the data base provides net capital stock statistics disaggregated in the following components: current-cost net capital stock of residential and non-residential structures; current-cost net capital stock of machinery and (non-transport) equipment; Current-cost net capital stock of transport equipment and; current-cost net capital stock of other assets. The figures are presented in national currencies.

The EUKLEMS database provides harmonised, industry-level data on production, value added, inputs, labour, investment and capital stocks across EU, USA and other high-income economies. The capital file provides data on GFCF and net capital stock in the following format: computing equipment; communication equipment; computer software; transport equipment; other machinery and equipment; residential structures; non-residential structures; cultivated assets; research and development, other IPP assets and; all assets. The data are presented in current prices, previous year prices and in volume 2015 reference prices, both measured in millions of national currencies.

Table 1: List of asset types

Total Fixed assets
.....Total Construction
.....Dwellings
.....Other buildings and structures
.....Machinery and equipment and weapon systems
.....Transport equipment
.....ICT equipment
.....Computer hardware
.....Telecommunications equipment
.....Other Machinery and equipment and weapon systems
.....Cultivate biological resources
.....Intellectual property products (IPP)
.....Research and development
.....Computer software and databases
.....Other IPP

Source: United Nations (2008-a)

### An overview of the PIM methodology for estimating capital stock

Most works that attempt to estimate capital stock employs some variant of the Perpetual Inventory Method (PIM). As stated before, most recent works and international organisations that produce databases on capital statistics (Berlemann and Wessrlhoft, 2014; Derbyshire et al., 2013, Inklaar and Timmer, 2015; Luiss Lab of European Economics, 2021) employ the PIM methodology outlined in in the two editions of the OECD Manual- Measuring Capital (OECD, 2001, 2009). The PIM, as implied by its name, interprets a country's fixed capital stock as an inventory (Berlemann and Wessrlhoft, 2014). The PIM methodology involves accumulating past gross fixed capital formation and deducting the value of assets that have reached the end of their service lives. Both capital formation and discards of assets are revalued either to the prices of the current year (current prices) or to the prices of a single year (constant prices). To estimate the total capital stock, the following data and assumptions, broken down by type of asset, are required (OECD, 2013): i) a sufficiently long time series of data on fixed investment; ii) a sufficiently long time series of price indices (deflators); iii) information on initial capital stock at the time when the tomes series of investment start; iv) assumptions regarding the average service lives and the retirement function of the relevant assets and; v) assumptions regarding the depreciation function of the relevant assets.

One critical aspect of this methodology is the setting up of the depreciation method to account for the writing-off of consumed fixed capital. In the straight-line depreciation method, the consumption of fixed capital is linear in nature as can be seen in Equation (3) below. The corresponding mortality function is the "simultaneous exit", i.e., an asset is removed from the capital stock when its value has depreciated to zero in the final year of its service life (OECD, 2009). These assumptions are adopted by the Singapore Department of Statistics and, according to Maddison (1992, cited in Derbyshire et al., 2013), represent a useful approximation of reality when calculating the capital stock. However, OECD (2009) suggests that simultaneous exit is not a realistic retirement pattern and suggests that other retirement patterns that assume a certain bell-shaped function around the average age of retirement are more realistic.

The application of the PIM methodology involves the following steps (Derbyshire et al., 2013):

- The calculation of the gross capital stock:

$$CS_t = \sum_{i=0}^{d-1} I_{t-i} \quad (1)$$

Where  $CS_t$  is the capital stock in an asset in year  $t$ ;

$I_t$  is investment in year  $t$ ;

$d$  is the assumed service life of the asset

This values the gross capital stock at its historical (or acquisition) costs. The goal of the PIM, however, is to arrive at a valuation in prices of the year for which the value of the stocks is calculated;

- The revaluation of the capital to prices in year  $t$  from the value of the capital stock at its historical cost:

$$CS_{t,t} = \sum_{i=0}^{d-1} I_{t-i} * P_{t-i,t} \quad (2)$$

Where  $CS_{t,t}$  is the capital stock in an asset in year  $t$ , in prices of year  $t$ ;

$P_{t-i,t}$  is the price in year  $t-i$ , with  $t$  the year  $t$  to which the capital stock is valued;

- The calculation of the net capital stock from the gross capital stock minus the accumulated consumption of fixed capital:

$$NCS_{t,t} = \sum_{i=0}^{d-1} (I_{t-i} * P_{t-i,t}) * (1 - \frac{i}{d}) \quad (3)$$

Where  $d$  is the assumed service life of the asset;

$i$  is the current year the asset is at within its service life.

An approach of estimating the capital stock in the benchmark year, which is recommended by OECD (2009) is based on Harberger (1978). This approach employs neoclassical growth theory and relies on the assumption that the economy under consideration is in its steady state (OECD, 2009). As a consequence of this assumption, output grows at the same rate as the capital stock, i.e:

$$K_{t-1} = I_t / (gI + \delta)$$

Where  $I_t$  is investment in the initial year;

$\delta$  is the depreciation rate (geometric depreciation) and;

$gI$  is an estimate of the steady-state growth rate of investment in that asset, typically implemented as an average growth rate in the first years of the observation period.

## Estimates of the built capital stock in Cape Verde

**Data and assumptions.** As discussed above the application of the PIM to estimate the Built Capital Stock require a set of assumptions and inputs: i) an initial bench-mark estimate of the country's built capital stock; ii) statistics on gross fixed capital formation in construction extending back to the bench-mark year; iii) asset price indices; iv) depreciation function to devalue the assets; and v) information on the average service lives of different construction assets and on the mortality function.

The depreciation method and mortality function referred to above are, respectively, the linear depreciation method and the simultaneous retirement pattern. With respect to average service lives, The OECD Manual (OECD, 2001; OECD; 2009) presents average services lives for different type of assets for a number of countries. For example, the average services lives used by the Singapore Department of Statistics are:

- Residential Buildings- 80 years
- Non-residential Buildings-40 years
- Other Construction and Works-40 years
- Ships and Boats- 20 years
- Aircraft -15 years
- Road Vehicles- 10 years
- Machinery and Equipment- 15 years

A study dealing with the capital stock in the NUTS 2 regions of the EU-28 (Derbyshire et al., 2013) adopted a service life of 68 years for housing construction, 50 years for civil engineering works and 38 years for 'other' assets.

The National Accounts of the Cape Verde's National Statistical Office presents data on gross fixed capital formation in construction that are consistent with the SNA of the United Nations. In the 'Old Series' of the National Accounts, construction investment data for the period 1980-2007 are disaggregated in the following format: residential housing; non-residential housing; civil engineering works and 'other' construction. The 'New Series' of the National Accounts presents data for the period 2008-2014 that are disaggregated by: private construction works; and public construction works. It was assumed, based on the 'Use and Supply Table' of the National Accounts, that civil engineering works and 'other' construction works for the period 2008-2014 represent 80% of the public construction works.

Thus, for reasons of consistency in the data throughout the period 1980-2014, these are disaggregated in the following type of assets: building construction; and civil engineering works and other construction. The assumed averaged service lives are the following:

- Building construction – 60 years
- Civil engineering and other construction works - 45 years.

In order to estimate the initial capital stock in the benchmark year (1980), the OECD Manual provides some recommendations for estimating the stock of structures under limited information. When the housing stock is used as input, a minimum of the information that is required is the following (OECD, 2009):

- the number of dwelling units at mid-year of the period under consideration ( $WD_t$ ), which is usually available from the most recent census;
- an estimate of the long-term growth rate ( $b$ ) of the number of dwellings;
- the average price level of period  $t$  of a newly constructed dwelling (of a particular category), excluding land ( $POD_t$ ), where the subscript 0 indicates the age of the asset which in the present case is new.
- an estimate of the expenditure on major improvements on dwellings and land during the present year ( $POD_t Mt$ ).

The 2010 Census of Population and Housing (INE-CV, 2011) provides some useful information for estimating the initial built capital stock, by using the OECD methodology. According to (INE-CV, 2011) the number of buildings in Cape Verde totalled 114,469 units in 2010. The rate of increase in the the number of buildings in the period 1975-1985 was 3.41% per year. This can be assumed as the long-run annual growth rate in the number of buildings. As there are no available data on major improvement in housing, it is assumed that the share of major improvement to total housing investment in 1980 was 0.1. The average service life is set up at 60 years and the depreciation rate is 0.02667 (geometric depreciation), as recommended by OECD (2009).

## **Results and discussions.**

- Net Built Capital Stock in 2014

The net capital built capital stock for 2014 is the sum of the results of three aggregates: i) accumulation of the fixed capital formation, net of depreciation, in the period 1980-2007; accumulation of the fixed capital formation, net of depreciation, in the period 2008-2014; the initial net bench-mark stock, also net of depreciation. As stated above, the service lives for building construction and civil engineering works are, respectively, 60 and 45 years. The depreciation method is the straight-linear one.

#### -Period 1980-2007

Data on GFCF in construction for this period is available both in current prices and at 1980 constant prices. Thus, constant prices data are used for calculating net capital stock in construction according to equations 2 and 3. The figures are firstly rebased to 2007 prices by using a series of GFCF deflators (residential housing, non-residential housing and civil engineering works) and then revalued at 2014 prices by using the private GFCG and public GFCF's implicit chain-linked indices for, respectively, building construction and civil engineering works. For reasons of international comparability, the results are presented in Euros (1€ =110.265 CVE).

Net Capital Stock in Building Construction = €1,910,366,464;  
Net Capital Stock in Civil Engineering Works = € 612,215,504;  
Total Net Capital Stock in Construction= € 2,522,581.966.

#### -Period 2008-2014

Data on GFCF in construction for this period is available at both current prices and chained-linked prices at the 2007 reference year. Firstly, data at the 2007 prices are used for calculating the net capital stock in construction according to equations 2 and 3. The results are then revalued at 2014 prices by using the private GFCG and public GFCF's implicit chain-linked indices for, respectively, building construction and civil engineering works. Again, the figures are presented in Euros.

Net Capital Stock in Building Construction = €1,311,094,503;  
Net Capital Stock in Civil Engineering Works = € 909,999,083;  
Total Net Capital Stock in Construction= €2,221,093,586.

#### -Net Built Stock of the Base-year Stock (1980)

New housing investment in 1980 (It) = € 4,451,095 (1980 constant prices)

Average Service Life = 60 years

Rate of depreciation ( $r$ ) = 0.02667

Long-run growth rate per year ( $b$ )= 0.0341

Share of major improvements ( $\alpha/b$ ) = 0.1

$C = (1 + \alpha/b) (1+b) / (b + r) = 18.12$ , which corresponds to the ratio of new investments to the net stock.

Net stock of dwelling at the base-year =  $It * C = € 80,653,860$

The calculation of the net capital stock in 2014 is made in the same manner as that of the period 1980-2007

Net Capital Stock in Building Construction (2014) = €132,780,334.

- Ratio of Capital Stock to GDP

The value of the country's net built capital stock in 2014 was € 4,876,455,888. Net capital stock in building and construction represents 69% of and civil engineering and other construction represents 31 % of the total stock. The high value of the latter may be explained by the country's geographic location. Cape Verde holds four international airports, one of them (in Boa Vista Islands) is practically aimed at international tourism services. Furthermore, the country has taken advantage of the process of graduation to the middle- income status (international loans at concessional terms) to upgrade its infrastructure in transport, water and sanitation sectors (WTO, 2015).

According to the figures provided by EUKLEMS database (Luiss Lab of European Economics, 2021), the stock of dwellings and other construction structures represented between 80% and 90%

of the total net capital stock in the European Union countries, in the period from 1995 to 2019. As Cape Verde has a low manufacturing base, this ratio is expected to be at the higher tier. The country's GDP in 2014 totalled 1,400.60 million Euros. Thus, the ratio of the capital stock to GDP is estimated at 3.48.

In an international perspective, this ratio seems to be an outlier. In fact, figures provided in (Derbyshire et al., 2013) indicate that the most advanced economies in the then European Union (including Germany, France, The Netherlands and Italy) had, in 1995, a capital-GDP ratio around 3 and the majority of the countries, including United Kingdom, had this ratio in the range between 2.5 and 3. Neo-classic growth theory implies that the returns of capital diminishes at a rate which depends upon the amount of capital already put in place (Aghion and Howitt, cited in Derbyshire et al., 2013). However, it also implies that the more advanced an economy is the higher the capital-output ratio tends to be because it will be nearer the 'steady state'.

Be that as it may, Cape Verde has amassed a considerable wealth in built capital stock and has a capital-output ratio somewhat inconsistent with its economic development status. Figures provided by the National Statistical Office (INE-CV- b, various years) show that GFCF represented 35 to 40% of Cape Verde's GDP in the period between 1990 and 2014.

Of course, every developing country aspires to attain the main economy and social targets encapsulated in the *Sustainable Development Goals* (SDGs). As Cape Verde is well positioned for attaining the key targets of the SDGs (INE-CV, 2016), it is reasonable to suggest that sound economic considerations should be the primary base for the planning of new construction investment projects.

## Concluding remarks

This paper has presented an overview of the Perpetual Inventory Method (PIM) used for estimating capital stock and has discussed some methodologic issues regarding the measures of construction investment and built capital stock. Additionally, based on the results of an earlier work, estimates of the Cape Verde's built capital stock for the year 2014 have been presented. The results of the analysis have shown that Cape Verde has a fixed capital-GDP ratio that is inconsistent with its economic development status.

The role of construction infrastructure in the development process in the less developed countries of the world, particularly in Sub-Saharan Africa, has been meriting a special attention from the part of national bodies and international development agencies. As has been pointed out Ruddock and Ruddock (2012), whether infrastructure financing comes from private or public funding, good infrastructure will continue to be a prerequisite for economic and social development in developing countries. However, what matters most is not the amount of infrastructure de per se, but the quality of services rendered by the infrastructures. Thus, the knowledge of reliable data and measurement of a country's stock of buildings and other construction assets are a crucial element for the long-term management of these assets.

Built stock statistics in most developing countries are not disaggregated in a consistent way, letting alone the lack of disaggregation in different built assets, either by type or economic sector. Further studies of individual countries in different stages of economic development would provide a more comprehensive picture of the relationship between construction investment and economic growth and development.

## References

- Bellermann, M and Wesselhoft, J., *Estimates of Aggregate Capital Stock Using the Perpetual Inventory Method*, Review of economics, 65, Jg, (2014) 1-34.
- Derbyshire, J, Gardiner, B, and Waights, S., *Estimating the Capital Stocks for the NUTS2 Regions of the EU-27*, Applied Economics 45 (9), (2013)1133–1149.

Eurostat (2010), European System of Accounts 2010, available at: <http://ec.europa.eu/eurostat/data/database>.

HARBERGER, A. C. (1978): *Perspectives on Capital and Technology in Less Developed Countries*. In: M. J. Artis and A. R. Nobay (Eds.), *Contemporary Economic Analysis*, London, 42–72.

INE-CV (various years-a), National Accounts-Main Indicators (Old series), National Statistical Office, Cape Verde.

INE-CV (various years-b), National Accounts-Main Indicators (New series), National Statistical Office, Cape Verde.

INE-CV (2011), 2010 Housing and Population Census, National Statistical Office, Cape Verde.

INE-CV (2016), Cape Verde-Facts and Figures, National Statistical Office, Cape Verde.

Maddison, A, *Growth and Slowdown in Advanced Capitalist Economies*, *Journal of economic Literature*, 25 (2), (1987) 649-698.

Lopes, J., Oliveira, R., Abreu, M.I. , *Estimating the built environment stock in Cape Verde*, *Engineering, Construction and Architectural Management*, Vol. 26 No. 5, (2019) 814-826.

Maddison, A (2006), *The World Economy*, OECD Development Centre, OECD.

OECD (2001), *Measuring Capita-OECD Manual* (1st ed.), OECD, Paris.

OECD (2009), *Measuring Capita-OECD Manual* (2nd ed.), OECD, Paris.

OECD (2013), *Understanding the Value of Transport Infrastructure – Guidelines for Macro-level Measurement of Spending and Assets*, The International Transport Forum, OECD, Paris.

Ruddock, L and Ruddock, S (2012), *Changes in Societies and Economies. New imperatives*, In G. Ofori (edt.), *New Perspectives on Construction in Developing Countries*, 17-40, Spon Press.

Ruddock, L. and Ruddock, S. , *Wealth measurement and the role of built asset investment: an empirical comparison*, *Engineering, Construction and Architectural Management*, Vol. 26 No. 5, (2019) 766-778.

United Nations (2008a), *System of National Accounts 2008*, available at: <https://unstats.un.org/unsd/nationalaccount/docs/sna2008.pdf>.

United Nations (2008b), *Industrial Standard Industrial Classification of all Economic Activities*, ISIC Rev-4, available at: [www.un-ilibrary.org/economic-and-social-development/isic-rev-4\\_8722852c-en](http://www.un-ilibrary.org/economic-and-social-development/isic-rev-4_8722852c-en).

## **Agile na gestão de projetos de construção com aplicação de metodologias digitais, com recurso a um estudo de caso**

MATOS Mariana<sup>1,a</sup>, RODRIGUES Fernanda<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro

<sup>2</sup>RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro

<sup>a</sup>marianamatos@ua.pt, <sup>b</sup>mfrodrigues@ua.pt

**Palavras-chave:** Gestão de Projeto, Projeto, Metodologias *Agile*, Estrutura Metálica e Planeamento.

**Resumo.** Tendo em conta o panorama de instabilidade económica associada à guerra e crise sanitária vivida atualmente, o preço do aço e outros materiais está a atingir preços nunca antes atingidos, pelo que há necessidade de investir noutras áreas que intervenham direta ou indiretamente com o processo construtivo e que compensem a escalada dos preços do aço, nomeadamente as áreas de gestão e planeamento recorrendo a ferramentas e metodologias inovadoras.

### **Introdução**

Atualmente, a Gestão de Projetos na área da construção é um processo complexo, dada a especificidade e complexidade de cada projeto, verificando-se a lenta adoção de metodologias e tecnologias inovadoras quando se compara com outros setores. A solução mais evidente para a resolução deste problema, passa por criar um planeamento mais eficaz, promovendo um maior controlo dos processos. No desenvolvimento deste trabalho, teve-se como objetivo analisar a aplicabilidade dos princípios *Agile* em projetos de construção com a finalidade de otimizar o planeamento e execução dos mesmos. Para tal, utilizou-se um caso de estudo, que consiste na execução de um pavilhão industrial em estrutura metálica, relativamente ao qual se a combinou o acompanhamento em tempo real da execução e montagem da estrutura com o desenvolvimento de investigação e pesquisa sobre os princípios *Agile* e a sua aplicação à construção. Todas as situações ocorridas durante a fase de execução da referida obra, foram registadas e analisadas, para se perceber de que forma poderiam ter sido melhoradas previamente e se o método adotado no planeamento e execução das atividades foram os melhores. Concluiu-se assim que, é possível otimizar o planeamento de um projeto de construção, recorrendo ao parcelamento das diferentes fases e, consequentemente a uma maior pormenorização, na fase de preparação e planeamento da obra, que levam à diminuição da probabilidade de ocorrência de erros e de atrasos, através da aplicação de princípios e técnicas *Agile*.

### **A gestão de projetos na construção**

**Enquadramento.** A Gestão de Projeto consiste num conjunto de conhecimentos, técnicas e ferramentas que são utilizadas para planear o projeto, na fase de organização e preparação, na fase de execução do trabalho até ao término do mesmo. O Project Management Institute [1] define que o ciclo de vida de um projeto é composto por 5 processos de Gestão de Projeto, nos quais se visa atingir os objetivos de cada projeto: iniciação, planeamento, execução, monitorização e controlo, finalização/encerramento, usados para categorizar as operações de Gestão de Projetos necessárias para administrar uma empresa ou supervisionar um projeto.

Para garantir que durante um Projeto tudo se desenvolve de acordo com o planeado e os objetivos estabelecidos são alcançados, existe na Gestão de Projetos uma série de processos e estratégias que facilitam e agilizam a respetiva execução. Da pesquisa bibliográfica efetuada, sobre o conceito de Projeto e, sintetizando todas as definições apresentadas, verifica-se uma convergência entre elas, já que praticamente todas consideram que os projetos:

- São organizações temporárias que têm início, duração e fim e têm limitações em termos de custo, qualidade e prazos.
- Oferecem um serviço ou resultado exclusivo, porque cada projeto é único e diferente, portanto, quando se inicia um projeto, considera-se um projeto novo, com novas características e novas metodologias.
- Têm o propósito de criar um produto ou serviço que é concluído quando os objetivos propostos na fase de conceção são obtidos.
- São compostos por atividades coordenadas e controladas.

As empresas e organizações têm vindo, cada vez mais, a implementar os procedimentos de Gestão de Projetos, ao longo de todas as fases de um projeto. No entanto, o incorreto uso e má aplicação dos princípios e metodologias de Gestão de Projetos em geral e, especificamente, no âmbito do planeamento, levam à ocorrência de falhas e erros, tornando-se crucial agir de forma a prevenir estes acontecimentos, através, por exemplo, da aplicação de princípios *Agile* e do recurso a procedimentos e tecnologias digitais.

**Agile.** A fase inicial deste trabalho consistiu numa pesquisa sobre as metodologias *Agile*, perceber os métodos, princípios e valores que esta defende e de que forma poderia melhorar os projetos de construção e se seriam exequíveis na fase de construção de um edifício.

O *Agile* não se concentra com tanto detalhe no planeamento como o Lean, mas cria respostas rápidas e eficazes perante qualquer mudança, estando sempre preparado para situações imprevisíveis e incertas [2]. Ao permitir uma resposta rápida a qualquer mudança ou imprevisto, permite melhorar os resultados e, durante todo o processo de desenvolvimento do projeto contribui para se atingir os objetivos com o máximo de benefício. O *Agile* divide o desenvolvimento do projeto em subprojectos, para uma melhor avaliação do ritmo das equipas, para um apoio efetivo no planeamento e execução do projeto, recorrendo a equipas compostas por elementos autónomos e capacitados, focados na realização e planeamento dos subprojectos, com o objetivo de diminuir os riscos e custos do mesmo. Como ferramenta detalhada de planeamento pode-se recorrer ao Last Planner System, principalmente quando se trata de atividades de construção.

**Agile na gestão de projetos de construção.** A Gestão de Projetos tem evoluído muito nos últimos anos, estando as empresas a integrar já nos seus processos de gestão, os princípios *Agile*, encontrando-se na imprevisibilidade e na respetiva resposta a oportunidade para criar valor. Quando o objetivo é aplicar os princípios *Agile* na construção é necessário analisar três etapas do desenvolvimento de um projeto: pré-projeto (ou planeamento inicial), projeto (ou fase de conceção) e execução.

Cada uma destas fases tem as suas metodologias e formas de reagir aos problemas e dificuldades, no entanto, quando se tenta aplicar os princípios *Agile*, nem sempre é fácil. Torna-se importante que, antes de se iniciar qualquer projeto, todos os elementos que façam parte dele, tenham a possibilidade de ter formação, para se enquadrarem e consciencializarem dos seus detalhes e procedimentos, para facilitar e melhorar a comunicação e, conseqüentemente, o resultado final de todo o processo. Na fase de pré-projeto, devem aplicar-se desde o início os princípios *Agile*, para que não existam problemas que, conseqüentemente, sejam levados para as fases seguintes. Caso sejam utilizados os princípios *Agile* [3, p. 60], consegue-se ter mais sucesso e facilidade nas fases posteriores, pois o *Agile* pretende solucionar os problemas que surgem. Na fase de projeto, é necessário ter em conta que cada projeto é um projeto diferente, uma vez que, o conteúdo a desenvolver/solucionar tende a ser apenas focado no projeto em causa. Para isso, é importante esta fase ficar orientada para toda a fase posterior de construção, para que esta seja realizada com o mínimo de problemas e com o maior sucesso possível [3, p. 61]. Como é de esperar, as equipas de projeto são diferentes de projeto para projeto, sendo necessário cada equipa debruçar-se sobre o que

lhe compete. É importante também valorizar a comunicação e interação entre outros elementos da equipa. A fase da execução talvez seja a fase mais complicada para se aplicarem os princípios *Agile*, sendo importante, que as organizações valorizem as ferramentas que o *Agile* oferece, melhorando assim a qualificação e cultura de todos os trabalhadores, para consequentemente enriquecer e melhorar a aprendizagem tradicional.

**Metodologia.** O objetivo principal deste trabalho foi verificar a aplicabilidade e as vantagens da utilização dos princípios *Agile*, num projeto de construção. Para se dirigir este objetivo procedeu-se à análise dos conceitos *Agile*, à análise das metodologias ou dos métodos de planeamento que mais se adaptam à construção e que vão de encontro aos objetivos *Agile* e à aplicação dessas metodologias num caso de estudo. Foi assim possível analisar as falhas que ocorreram no caso de estudo e, depois da aplicação dessas metodologias, analisar como é que essas falhas poderiam ter sido evitadas, isto é, se se tivesse efetuado um planeamento diferente. O caso de estudo permitiu retirar as principais conclusões relativamente às vantagens que ocorreram com a aplicação dessas metodologias.

## **Estudo de caso**

Com o objetivo de se analisarem as principais causas de ineficiências que ocorrem no decurso da execução de uma empreitada, e de se analisar a possibilidade de implementação dos princípios *Agile* para as prevenir e eliminar, optou-se pelo desenvolvimento de um estudo de caso: a construção de um pavilhão com estrutura metálica. O desenvolvimento do trabalho relativo ao estudo de caso resultou da combinação de um acompanhamento constante e em tempo real, da execução e montagem da estrutura metálica de um pavilhão, com o desenvolvimento de investigação e pesquisa sobre os temas relacionados com o *Agile* e as ferramentas de planeamento. O desenvolvimento em simultâneo destas duas frentes de trabalho permitiu tirar o máximo de conhecimento do estudo de caso em análise, já que a investigação e o conhecimento teórico previamente adquirido permitiram que o acompanhamento em tempo real na obra fosse mais preciso e completo, dando a visão do que se poderia desenvolver e aplicar para otimizar os procedimentos. Na indústria da construção existe a probabilidade da ocorrência de imprevistos, tendo estes como uma das suas consequências, baixos níveis de produtividade, pelo que, se devem identificar o mais cedo possível e procurar soluções para minimizar os impactos que possam vir a ter no decurso da obra. Uma das maiores falhas deste setor é a tendência para usar medidas corretivas após a ocorrência de erros, pelo que a proposta deste trabalho é a implementação de modelos preventivos de forma a evitar estes mesmos erros.

**Descrição do estudo de caso.** O edifício em estudo contém uma grande variedade de categorias de utilização, fazendo desta obra um projeto de elevada complexidade tanto ao nível de diversidade de sistemas estruturais, como de necessidades de planeamento diferentes e, ainda, de uma exigente articulação entre as várias frentes de obra que compõem todo o empreendimento. Associada a esta complexidade e exigência, surge a necessidade de enquadrar a execução da obra numa janela temporal limitada, fazendo com que seja necessário um esforço adicional em termos de calendarização e gestão do planeamento. Perante uma grande variedade de subempreitadas a ocorrer dentro da megaestrutura, decidiu-se acompanhar a fase respeitante à estrutura metálica destinado aos escritórios, zona comercial e cais de descarga, de forma a realizar uma análise mais detalhada e pormenorizada. A estrutura metálica conecta com a estrutura base em betão armado (estacionamento subterrâneo), e a conexão entre estes dois sistemas estruturais efetiva-se através de chumbadouros embebidos na laje aligeirada de betão armado, os quais permitem o arranque dos elementos verticais da estrutura metálica. Dentro de toda a área em estrutura metálica, o objeto de estudo apenas compreende a parte assinalada a cinzento na Figura 1, uma vez que, toda a restante parte terá o mesmo procedimento e sequência de atividades pelo que a análise seria repetitiva.

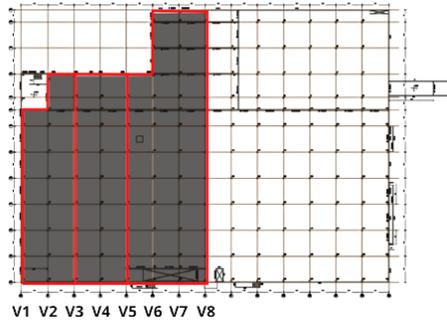


Figura 1: Divisão em 3 partes da área em estudo (elaborado pela autora)

**Acompanhamento e análise da obra.** Inicialmente, foi fornecido um planeamento do empreendimento de carácter bastante genérico (Figura 2), com uma perspetiva macro, sem grande detalhe, das diferentes partes da execução da obra que foram atribuídas a cada subempreiteiro. Perante este planeamento inicial e, dada a necessidade de haver uma linha de ação mais detalhada, tornou-se necessário a reformulação mais pormenorizada deste planeamento.

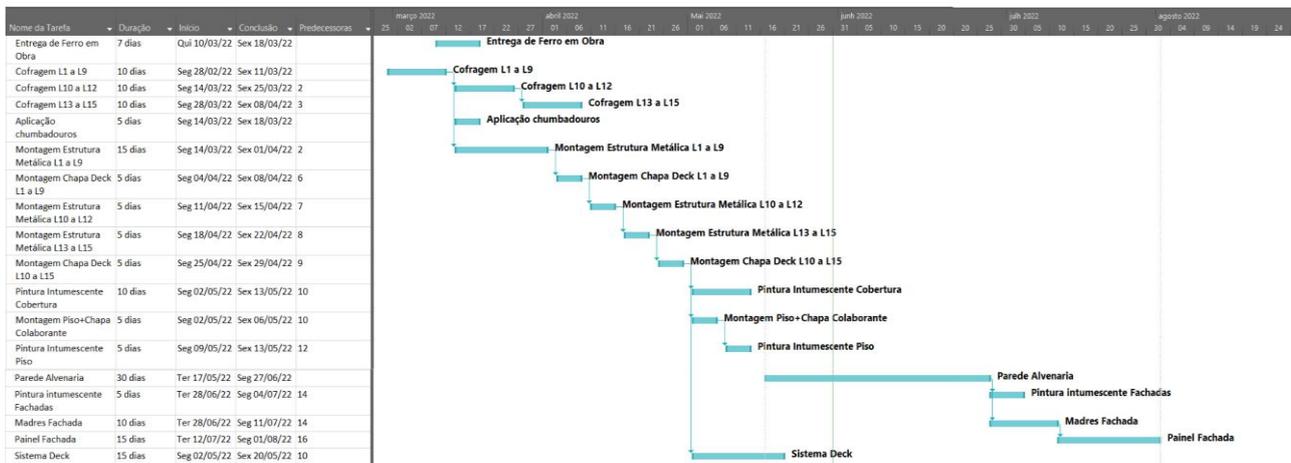


Figura 2: Planeamento inicial da estrutura completa

Efetuuou-se assim, um planeamento detalhado recorrendo a um software de apoio ao planeamento de projetos, para facilitar numa fase posterior a análise da aplicabilidade dos princípios *Agile*. A metodologia usada no estudo de caso passou por reunir informação, registar e analisar acontecimentos em obra, através de várias frentes:

- Reuniões semanais com as equipas responsáveis.
- Períodos dedicados à observação e registo de todos os elementos considerados relevantes para obter resultados e dados para posterior análise, tais como falhas, erros, ocorrências, eventos, dinâmica das equipas, alterações e adaptações do planeamento.
- Acompanhamento dos processos construtivos e das várias atividades que compõem a execução da obra.
- Acompanhamento regular da evolução da montagem da estrutura metálica.
- Entrevista e contacto constante com os responsáveis pela execução da obra.
- Recolha de tempos de execução de atividades e análise dos resultados recolhidos durante todo o acompanhamento do estudo de caso, utilizando software específico de planeamento.

Na sequência da análise destes dados foi possível identificar um conjunto de imprevistos que surgiram em consequência dos resultados do primeiro planeamento, que se descrevem na Tabela 1.

Tabela 1: Imprevistos que surgiram ao longo do primeiro planeamento

Problemas de licenciamento	Existência de uma pequena parte do terreno que pertencia ao município.
Problemas construtivos	Impossibilidade de colocação dos chumbadouros como previsto em projeto devido à grande densidade de armadura.
Problemas associados às condições climáticas	Más condições climáticas, levaram à impossibilidade de movimentação das mesas de cofragem para a execução das lajes do 1º piso.

**Análise da obra de acordo com o novo planeamento e as soluções adotadas.** Procedeu-se à retificação da solução inicialmente desenvolvida para o planeamento da obra com o intuito de criar um sistema novo de encadeamento de atividades mais detalhado, com otimização de processos e melhoria contínua na fase de montagem da estrutura metálica, e, conseqüentemente, para se otimizar os processos construtivos e os tempos de duração das atividades. A grande diferença entre o planeamento inicial e o novo planeamento reside na calendarização, que reflete o avanço de aproximadamente um mês de todo o diagrama de Gantt (Figura 3) devido aos atrasos ocorridos anteriormente e a implementação do novo método que consistiu na divisão da estrutura em lotes que aglomeram uma sequência de atividades que, em conjunto, constituem o processo de construção da estrutura, de forma a haver um maior controlo diário do rendimento das equipas e do acompanhamento e evolução do projeto. Após a tomada de conhecimento por parte de todas as equipas sobre as datas programadas e definidas em reunião, tornou-se claro e notório o impacto positivo que esta alteração provocou na organização e fluxo dos trabalhos. No entanto, como é normal, foram detetados alguns problemas e alterações de melhoria que surgiram ao longo de todo o projeto, tais como, questões relacionadas com a maquinaria afeta à montagem, decisões técnicas em termos construtivos em obra, incompatibilidades geométricas, impedimentos regulamentares e físicos ao desenvolvimento de atividades e otimização e entrega em obra de material.

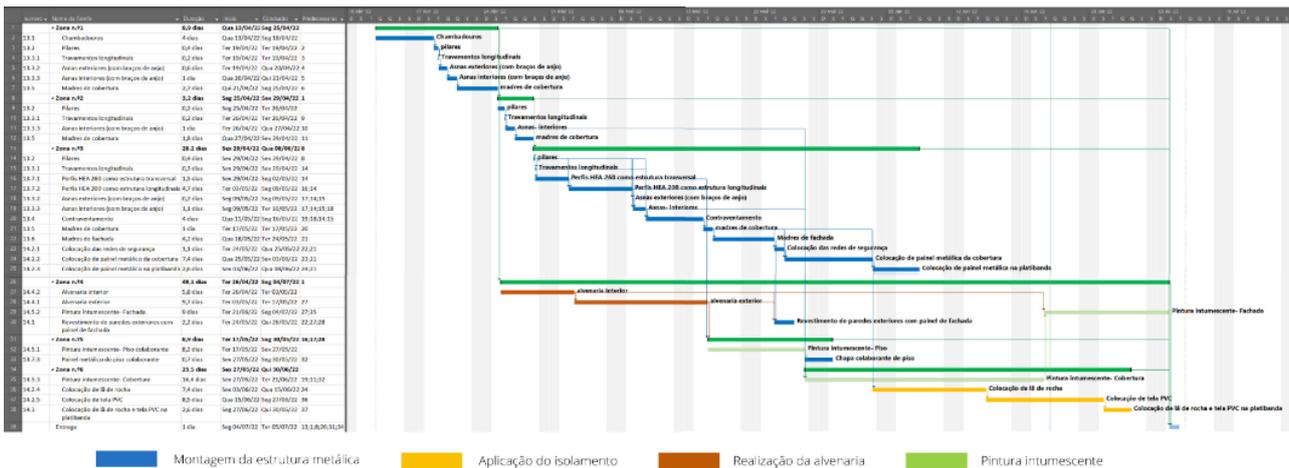


Figura 3: Novo planeamento (elaborado pela autora)

Desde a data de início da construção foi realizado em Excel, um documento de registos diários de acordo com o acompanhamento realizado em obra, que refletem os valores de produtividade das equipas na execução de várias atividades (Figura). Perante esta análise, calcularam-se os dias com produtividade acima e abaixo da média e os dias cuja produtividade cumpre o expectável e, ainda, as falhas que exigem análise detalhada para correções futuras. De notar que, o facto de se estar a tratar apenas de metade do projeto, por vezes surgem dias no planeamento em que não se encontra

qualquer atividade realizada, isto porque na impossibilidade de avanço do projeto em algumas atividades na secção em estudo, as equipas avançam para a restante parte da obra.

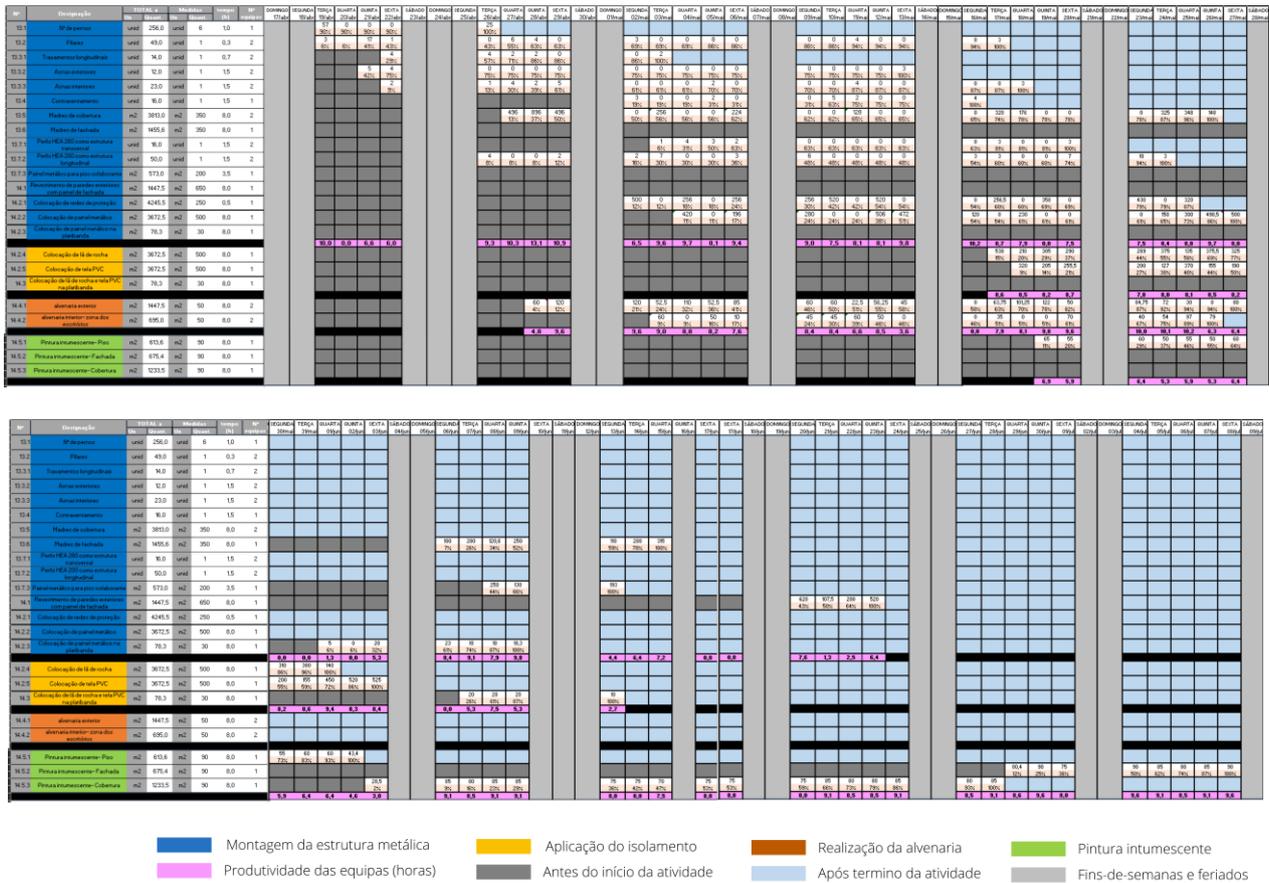


Figura 4: Planeamento real (elaborado pela autora)

Perante a nova reestruturação do planeamento, demonstra-se que mesmo iniciado o projeto e após vários problemas de atrasos, ainda é uma metodologia de fácil implementação em ambiente de obra. Na possibilidade desta metodologia ter sido adotada na primeira fase de planeamento, seria uma mais-valia para todo o projeto, visto que, é possível rentabilizar melhor o tempo das atividades por lotes (com atividades repetidas) não só porque é possível corrigir erros/falhas ocorridas nos lotes anteriores, como também, aperfeiçoar técnicas e métodos.

**Análise da baseline relativamente ao planeamento real.** Realizou-se um planeamento completo (Figura 5), onde consta o novo planeamento que funciona como *baseline* e o planeamento do efetivamente realizado em obra, de forma a ser possível fazer uma comparação e análise justificada das diferenças entre o programado e o real.

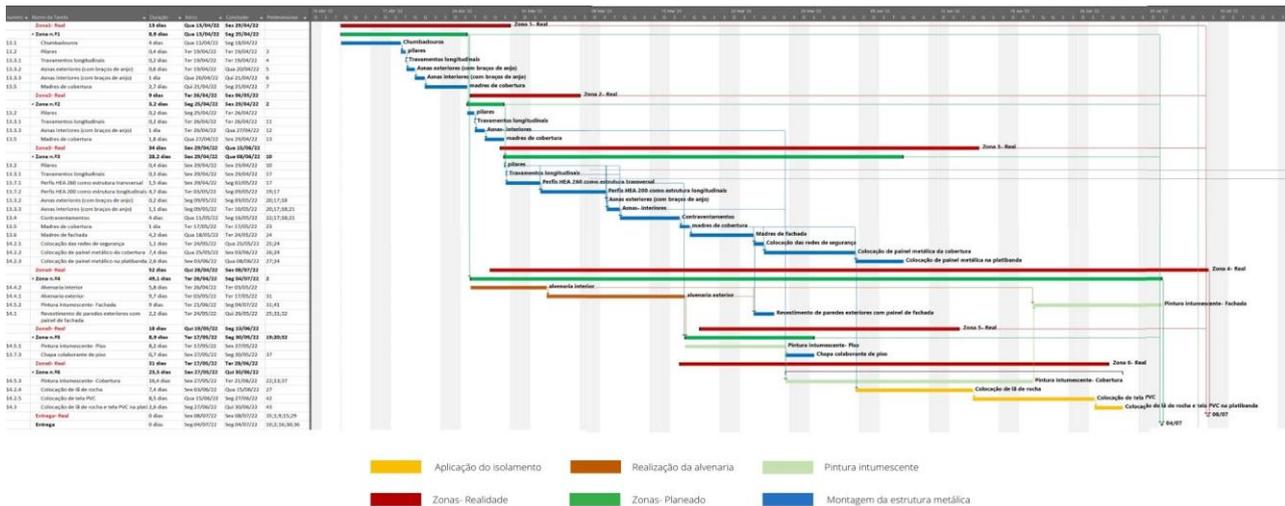


Figura 5: Sobreposição do novo planeamento com o *baseline*

Em forma de resumo, a área em estudo terminou no dia 8 de julho, quando a data prevista de finalização desta área no *baseline* era no dia 4 de julho, portanto, é de realçar que, apesar de alguns contratemplos, conseguiu-se entregar a obra apenas 4 dias após a data estipulada. Relewa-se ainda que, como se trata de uma data parcial (intermédia) para o prazo global da obra ainda é possível recuperar este atraso.

**Fatores que carecem de intervenção das metodologias Agile.** As metodologias *Agile* baseiam-se em vários princípios e valores que, em grande parte se fundamentam em técnicas usadas na condução de projetos, que tendem a proporcionar mais rapidez nos processos e na conclusão das tarefas. Como qualquer outra metodologia, para que uma empresa a possa adotar, é necessário que haja um investimento em tecnologia, para adquirir novos softwares, novos recursos tecnológicos que auxiliem no planeamento e gestão de projetos e enriqueçam o planeamento. Na Tabela 2 estão presentes alguns dos fatores que carecem da intervenção de metodologias *Agile*.

Tabela 2: Fatores que carecem de intervenção das metodologias *Agile*

Baixos níveis de produtividade	<ul style="list-style-type: none"> <li>O planeamento e programação inadequados, a falta de colaboração e comunicação entre as partes interessadas no projeto e o tempo útil desperdiçado na espera da entrega de materiais ou conclusão de trabalhos são dos maiores responsáveis por esta problemática. Este trabalho mal efetuado decorre geralmente de deficiências no projeto, erros e omissões e incompatibilidades entre várias especialidades.</li> </ul> <p>Tudo isto poderá ser minimizado se a filosofia por trás das metodologias <i>Agile</i> for implementada, por exemplo, através de equipas auto-organizadas, focadas continuamente nos objetivos estabelecidos, com briefings frequentes e um maior investimento e foco no desenvolvimento de melhores técnicas de gestão.</p>
Gestão de tempo	<ul style="list-style-type: none"> <li>Uma fraca gestão resulta em projetos de má qualidade, altas taxas de acidentes e perdas de receitas para a empresa.</li> </ul> <p>Uma correta programação das atividades que contabilize os riscos imputáveis aos diversos trabalhos e possíveis imprevistos em obra, vai minimizar os atrasos e assegurar que a sequência de tarefas conduza a processos construtivos mais eficientes. Por este motivo, os órgãos de gestão devem considerar todas as variáveis potencialmente causadoras de atrasos e projetar fluxos de trabalho que garantam uma maior produtividade e rendimento.</p>

Tabela 2: Fatores que carecem de intervenção das metodologias *Agile* (continuação)

<p>Gestão de comunicação</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A falta de comunicação ou incoerência na transmissão de dados e informações pode resultar numa redução da qualidade do projeto. Desta problemática podem decorrer acidentes, falhas na entrega de materiais, baixa produtividade e incumprimento nos prazos de entrega.</li> </ul> <p>Para melhorar a comunicação deve-se evitar o excesso de informação e tentar que esta seja padronizada para todos os intervenientes. Os princípios <i>Agile</i> propõem como solução, o aumento da “face to face”, entregas frequentes, confiar e apoiar e o trabalho em conjunto e atenção contínua.</p>
<p>Sustentabilidade</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A eliminação de desperdícios é um ponto fulcral no planeamento e execução de um projeto, uma vez que, quanto maior a quantidade de processos tiver o projeto, maior número de recursos, mais equipamentos e profissionais são necessários. Consequentemente, maior será o desperdício e menor será o aproveitamento e inter-relacionamento entre as diversas ferramentas, equipas e outros elementos inerentes à obra.</li> </ul> <p>Desta forma, é importante estar consciente da existência de procedimentos e variáveis em obra que possam estar em excesso ou que não são aproveitados no seu potencial máximo.</p>
<p>Impactos não previstos e Impactos imprevisíveis</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Os exemplos mais pragmáticos e mais comuns de impactos não previstos são os que podem decorrer das ações climáticas, a ocorrência de acidentes de trabalho, erros técnicos e atrasos de entregas constituem um acréscimo de imprevisibilidade à obra.</li> <li>Acontecimentos imprevisíveis da atualidade são a pandemia e a guerra da Rússia com a Ucrânia que provocaram atrasos nas exportações, uma crise energética e o aumento generalizado dos preços de materiais e matérias-primas, como foi o caso do aço e do gasóleo (Figura).</li> </ul>
<p>Seccionamento do planeamento em várias partes</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Após ter iniciado a construção, houve a reestruturação do planeamento global inicial para o novo planeamento fragmentado em fases limitadas e mais pormenorizado.</li> </ul> <p>O modelo de metodologia <i>Agile</i> caracteriza-se pelo seccionamento de cada projeto em pequenas subpartes, em pequenos períodos de tempo e cujo acompanhamento seja frequente.</p>
<p>Antecipação da chegada de materiais</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Devido a todos os problemas vivenciados na atualidade, é desde logo relevante que o material chegue à obra antecipadamente, garantindo assim o início da atividade no dia previsto. A escassez e aumento do preço dos materiais é um fator condicionante e criador de atrasos ou de retificações de preços de encomendas, o que por si só pode implicar um aumento do preço global da obra.</li> </ul> <p>A recente alteração do paradigma mundial, que resultou numa crise económica, vem contrariar um dos princípios defendidos pelo <i>Agile</i> (<i>o just in time</i>), já que a irregularidade e imprevisibilidade das cadeias de transporte obriga à necessidade de haver stock não só para garantir uma entrega efetiva como também para garantir o preço do produto.</p>
<p>Importância do Last Planner System num projeto</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>O Last Planner System surge no projeto como uma ferramenta de planeamento, sendo uma vantagem quando aplicado a determinados períodos da obra que careçam de maior pormenorização e atenção.</li> </ul> <p>Aplicando este sistema ao estudo de caso, consegue-se acompanhar o conjunto de atividades, antecipar falhas e riscos e controlar todo o tipo de recursos envolvidos e o cumprimento de matérias de carácter regulamentar e legal, tal como apresentado na Tabela 3.</p>

Tabela 2: Fatores que carecem de intervenção das metodologias Agile (continuação)

<p>Segurança em obra</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A segurança e saúde no trabalho condiciona diretamente a generalidade do projeto e deverá ser tomada em consideração e antecipada, uma vez que, a qualidade total de um projeto não pode ser manchada pela sinistralidade. Um projeto de qualidade também subentende um normal decorrer dos trabalhos sem incidentes que resultem em morte ou ferimentos dos trabalhadores.</li> </ul> <p>Com recurso ao Last Planner System, é possível detalhar as atividades que envolvem perigos e risco ou que, por serem complexas, exijam uma análise mais completa.</p>
<p>Metodologia de trabalho</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>A gestão e entrega de projetos bem-sucedidos exigem controlo sobre todos os aspetos do projeto, por exemplo, uso de recursos, incluindo horas de trabalho, materiais e equipamentos. Em termos de metodologia de trabalho verificou-se que apesar do projeto ser desenvolvido segundo a metodologia BIM, o modelo foi utilizado apenas para a fase de projeto.</li> </ul> <p>Recorrer à utilização do modelo BIM na fase de gestão de obra é uma mais-valia para todo o empreendimento, tanto para o planeamento como para a fase posterior de manutenção do edifício, possibilitando uma quantificação exata do previsto e do executado em qualquer momento.</p>

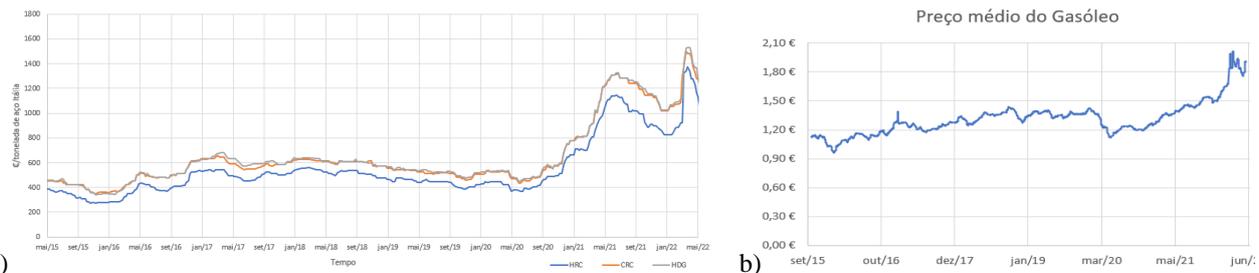


Figura 6: a) Gráfico da variação do preço do aço em Itália (in IMF-Informação de mercados financeiros, 2022); b) Gráfico da variação do gasóleo (in Preço dos combustíveis)

Tabela 3: Last Planner System de uma semana que engloba riscos de segurança e várias atividades de diferentes tipologias

Descrição atividades a concluir na semana		Data					Obra										Segurança		Qualidade		Avaliação	
Semana	Nº	EE	2ª	3ª	4ª	5ª	Atividade precedentes	Materiais	Mão de obra	Equipamentos	Projeto	Espaço	Condições externas	Existência da atividade no PPS (principais riscos)	Aprovação dos materiais/ Procedimentos de qualidade	Ambiente	Controlo	Explicação dos riscos				
																PREV	REAL					
2309/2022	22		x	x			21	Madres	Oficiais (1) Serventes (1)	vestuário, luvas, capacete, colete e calçado de proteção	Montagem da estrutura metálica secundária	Exterior	Interferem	Sim-Queda em altura. Queda de materiais. Uso de máquinas e ferramentas sem proteção apropriada	Conformidade com os desenhos técnicos.	Obra	100%	0,0%	Coerência de vento forte que impeça o manuseamento e movimentação da grua.			
2409/2022	23			x	x		21,22	Rede de proteção	Oficiais (2) Serventes (3)	vestuário, luvas, capacete, máscara, colete e calçado de proteção. Equipamento de proteção contra quedas	Redes de proteção	Exterior	Interferem	Sim-Queda em altura.	Certificação da rede de segurança por uma entidade certificadora	Obra	100%	100,0%	Coerência de vento forte que dificulte a montagem da rede. Queda de materiais em altura.			
2509/2022	24				x	x	21,23	Panel metálico	Oficiais (2) Serventes (3)	vestuário, luvas, capacete, máscara, colete e calçado de proteção. Equipamento de proteção contra quedas	Execução da cobertura	Exterior	Interferem	Sim-Queda em altura.	Sobreposição nas uniões das chapas de cobertura de 20cm e correto aparafusamento	Obra	100%	100,0%	Coerência de vento forte que impeça o manuseamento e movimentação da grua.			
2609/2022	30			x	x	x	22,27	Panel de fachada	Oficiais (2) Serventes (2)	vestuário, luvas, capacete, máscara, colete e calçado de proteção. Equipamento de proteção contra quedas	Revestimento da fachada	Exterior	Interferem	Sim-Queda em altura. Queda de materiais. Uso de máquinas e ferramentas sem proteção apropriada	Garantir que a junta entre painéis está conforme arquitetura	Obra	100%	0,0%	Acidente em obra que afete a interrupção a atividade, devido a queda.			
2909/2022	32		x	x	x	x	16,17,28	Tinta intumescente	Oficiais (1) Serventes (2)	vestuário, luvas, capacete, máscara, colete e calçado de proteção. Equipamento de proteção contra quedas	Proteção do piso	Interior	Interferem	Pintura realizada em obra que dificulte o acesso a alguns pontos da estrutura	Garantir espessura de tinta aplicada para satisfazer a resistência ao fogo a que se sujeta (F90 S50PC)	Obra	100%	100,0%	Quando se trata de pintura em obra, a sua realização é dificultada pelos vários elementos constituintes do elemento a pintar.			
2309/2022	33					x	32	Panel metálico	Oficiais (1) Serventes (1)	vestuário, luvas, capacete, máscara, colete e calçado de proteção. Equipamento de proteção contra quedas	Chapa colaborante	Exterior	Não interferem	Sim-Queda em altura.	Sobreposição nas uniões das chapas de piso de 10cm e correto aparafusamento	Obra	100%	0,0%	Acidente em obra que afete ou interrompa a atividade, devido a queda.			
2309/2022	35					x	11,12,32	Tinta intumescente	Oficiais (1) Serventes (2)	vestuário, luvas, capacete, máscara, colete e calçado de proteção. Equipamento de proteção contra quedas	Proteção da cobertura	Interior	Interferem	Sim-Queda em altura. Remates de pintura com a estrutura que lhe é confinante	Garantir espessura de tinta aplicada para satisfazer a resistência ao fogo a que se sujeta (F90 S50PC)	Obra	100%	0,0%	Quando se trata de pintura em obra, a sua realização é dificultada pelos vários elementos constituintes do elemento a pintar.			

## Conclusão

O estudo de caso foi essencial para se conseguir atingir os objetivos estabelecidos porque, além de se tratar de um projeto com grandes dimensões e com diversas especialidades envolvidas, ajudou na percepção da necessidade de aplicação das metodologias Agile para todo o planeamento, gestão e organização das equipas. Ao longo de todo o trabalho e acompanhamento em obra foram registados todos os acontecimentos que a afetaram, acontecimentos que proporcionaram melhorias e acontecimentos que ocorreram como previsto sem qualquer interferência. Assim, foi possível analisar e testar a viabilidade da aplicação dos princípios Agile ao planeamento do projeto de construção em estudo. De forma a desenvolver um planeamento e processos de controlo mais

eficazes, foram apontadas detalhadamente todas as quantidades de atividades realizadas diariamente e, com recurso a médias fornecidas retiradas no início de cada atividade, conseguiu-se obter o rendimento diário e concluir a produtividade diária das equipas de cada especialidade. Com estes resultados, conseguiu-se perceber se os métodos adotados foram os melhores, ou quais os possíveis métodos que poderiam ter sido adotados de forma a evitar alguns dos acontecimentos. Percebeu-se assim, de que forma é possível otimizar o planeamento de um projeto de construção utilizando os princípios Agile e técnicas específicas.

### **Trabalhos futuros**

Um dos trabalhos futuros consistirá em se demonstrar que aplicar as metodologias Agile recorrendo ao BIM na fase de construção, contribui para aumentar a produtividade, qualidade e para o controlo eficiente do planeamento e dos custos da obra. Além disto, poder-se-á aplicar as metodologias de planeamento analisadas neste trabalho.

### **Referências**

- [1] Project Management Institute, *A guide to the project management body of knowledge- (PMBOK® Guide)*, 6 edition. 2017.
- [2] R. Owen and L. Koskela, *Agile Construction Project Management*, Greater Manchester.
- [3] R. Owen, L. Koskela, G. Henrich, and R. Codinhoto, *Is agile project management applicable to construction?*, Underst. Manag. Constr. Process Theory Pract. - 14th Annu. Conf. Int. Gr. Lean Constr. IGLC-14, (2006) 51–66.
- [4] IMF-Informação de mercados financeiros, *IMF 2015-2022*. 2022.

## Comparação de procedimento de orçamentação em ferramentas BIM 5D

MOREIRA Pedro Otávio Martins<sup>1,a</sup>, OLIVEIRA Roberta Bastos de<sup>1,b</sup>,  
ARAÚJO Lissa Gomes<sup>1,c</sup> e CARVALHO Michele Tereza Marques Carvalho<sup>1,d</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Brasília, Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília-DF, CEP 70910-900,  
Brazil

<sup>a</sup>pedro.moreiraproj@gmail.com, <sup>b</sup>robertab.o@hotmail.com, <sup>c</sup>lissagomesaraujo@gmail.com,  
<sup>d</sup>micheletereza@gmail.com

**Palavras-chave:** Orçamentação, BIM, Softwares.

**Resumo.** A metodologia BIM 5D consiste na utilização das informações extraídas de um modelo de construção 3D para dar suporte à elaboração de estimativas de custos e orçamentos para todo o ciclo de vida de um empreendimento. Com métodos e processos compatíveis com o contexto, é possível alcançar elevados níveis de precisão. Com o intuito de usufruir desses benefícios, o mercado oferece ferramentas que suportam o BIM 5D, como softwares e plug-ins, para as mais variadas utilizações e cenários. Nestas circunstâncias, esta pesquisa busca analisar e comparar algumas ferramentas de orçamentação disponíveis no mercado de forma a auxiliar futuras tomadas de decisão e produções científicas acerca do tema. Para viabilizar tal estudo, foi elaborado um modelo de uma edificação residencial, suficientemente alimentado com informações, para propiciar a elaboração de orçamento referenciado em IFC. Foram aplicadas as ferramentas Navisworks, OrçaBIM e QiVisus, selecionadas dentre as ferramentas disponíveis, para o desenvolvimento de uma Estrutura Analítica de Projeto (EAP), a extração de quantitativos e elaboração de orçamento. A metodologia adotada é composta por três etapas: a modelagem, orçamentação e comparação de ferramentas e possibilita a aplicação em outros softwares. As principais contribuições deste trabalho incluem a apresentação de informações que auxiliem a escolha das ferramentas aqui analisadas para o processo de orçamentação. Além disso, traz algumas informações sobre os processos reais de orçamentação com o auxílio das ferramentas já citadas, que podem auxiliar futuros trabalhos ou pesquisas acadêmicas. Por fim, esta pesquisa concluiu que não há ferramentas que se destacam, pois cada uma tem benefícios e limitações em situações específicas e podem, dessa forma, ser aplicadas em diversos contextos.

### Introdução

Existem vários indicadores para analisar o sucesso de uma obra ou empreendimento, mas um dos mais impactantes é o desempenho de custos [1]. Portanto, a discussão sobre o tema ainda é produtiva para o mercado e para a academia.

A falta de precisão na elaboração de orçamentos é um impactante causador de falha do desempenho de custos de empreendimentos [2]. Essas imprecisões são decorrentes, entre outros fatores, da utilização de processos antigos e produtos ultrapassados no mercado da construção civil, como a modelagem em CAD 2D, e a falta de colaboração entre as partes envolvidas [3], resultando em documentações imprecisas e que podem induzir ao erro os profissionais que extraem informação destes documentos. Frente a esta e outras problemáticas é que as discussões sobre o BIM (*Building Information Modeling*) se desenvolvem, a fim de aperfeiçoar os processos que envolvem a produção e gestão de projetos e empreendimentos.

Segundo Eastman *et al.* [4] os profissionais de custos dispõem de diversas opções para aproveitar ferramentas BIM na extração de quantitativos e para o processo de estimativa, porém nenhuma delas tem a totalidade das capacidades de planilhas especializadas, então os profissionais devem identificar o melhor método de trabalho para a estimativa específica.

Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é comparar três ferramentas disponíveis no mercado para a elaboração de orçamentos em BIM (Navisworks, OrçaBIM e QiVisus), a fim de avaliar a qualidade dos orçamentos produzidos e contribuir com os avanços tecnológicos e metodológicos na construção civil para aprimorar a previsão de custos de empreendimentos.

## Revisão de literatura

A utilização do BIM dentro da engenharia de custos (BIM 5D) abrange diversas atividades e níveis de desenvolvimento de projeto, e visa automatizar a extração de quantitativos. Diante dessas possibilidades, o impacto que a qualidade do modelo elaborado tem sobre as diversas etapas de orçamentação é notável, uma vez que as informações, denominadas parâmetros, devem estar atreladas a componentes que podem ser visualizados em 3D. Entretanto, essa proposta de automação de processos de gestão por meio de BIM 5D ainda é deficiente, devido à falta de suporte das tecnologias existentes, para a inserção de informações específicas de orçamento no modelo [5]. A identificação inteiramente automática destas condições por ferramentas BIM ainda não é viável [4], e, portanto, os orçamentistas devem considerar usar a tecnologia disponível para utilização em processos BIM a fim de melhorar critérios e métodos de orçamentação.

Eastman *et al.* [4] apresentam ainda quatro possíveis abordagens para a extração de quantitativos: (1) exportação para um *software* de orçamento usando as próprias ferramentas de extração dos *softwares*, como tabelas; (2) exportação dos objetos da edificação e/ou quantidades para softwares de orçamentação utilizando *plugins*; (3) exportação usando o IFC ou outros formatos semelhantes; (4) exportação dos objetos do modelo BIM, incluindo suas geometrias, para um *software* de gerenciamento de construção multifuncional e integralizado.

Merkel, Ioshimoto e Souza [6] comentam sobre a necessidade de uso mesclado do BIM com atuações “manuais” na quantificação de serviço, onde as vantagens do uso parcial da modelagem BIM, junto com apontamentos manuais, podem se apresentar como solução inicial para incentivar o uso do BIM por parte dos orçamentistas, até uma completa automatização desse processo.

A partir das discussões acima, este artigo apresenta a comparação de três ferramentas BIM com aplicação na orçamentação a fim de verificar a viabilidade e facilidade de uso de cada uma delas.

## Metodologia

A Metodologia adotada para este artigo foi dividida em três partes: (1) Mapeamento Sistemático da Literatura; (2) Modelagem BIM das disciplinas de Arquitetura e Instalações Hidrossanitárias e Elétricas; (3) Extração de quantitativos em BIM e registro das lições aprendidas.

O Mapeamento Sistemático da Literatura (MSL) serviu como base para a seleção dos *softwares* mais recorrentes nas publicações acadêmicas. As buscas foram feitas no agrupador Periódicos CAPES e na base de dados Web of Science, que apresentaram resultados similares. Na base Web of Science, obteve-se um apanhado mais geral onde vários dos trabalhos no campo dos resultados não estavam diretamente ligados aos conceitos de BIM 5D, porém, foi de extrema importância para o entendimento do contexto BIM na ótica das produções científicas mais recentes (2018 a 2021). Já no Periódicos CAPES os resultados foram bem mais específicos e direcionados, embora grande parte deles já tivessem sido observados na busca anterior. A Figura 1 mostra o fluxo adotado, período de pesquisa e os filtros aplicados. O resultado da busca pelos *softwares* pode ser verificado na Tabela 1, com um resumo das principais funcionalidades de cada um por meio da leitura integral dos artigos.

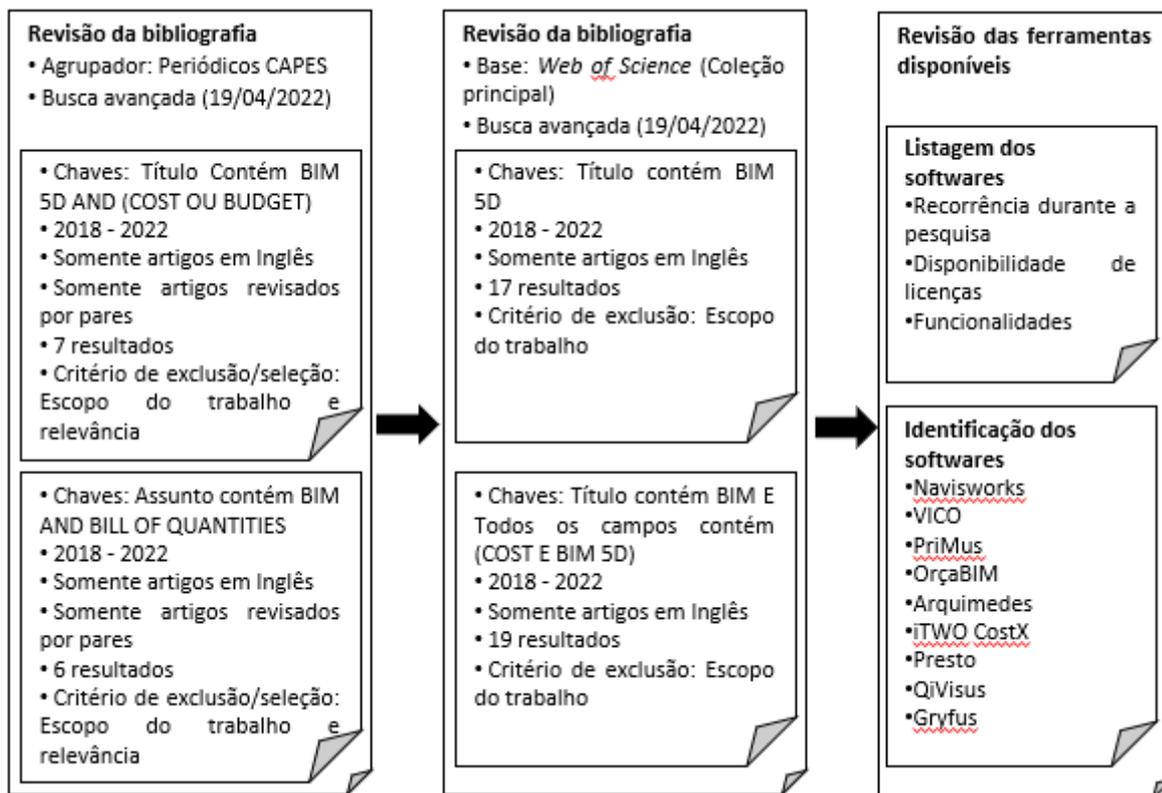


Figura 1: Fluxo adotado no Mapeamento Sistemático da Literatura

Em seguida, foi necessário selecionar três ferramentas para os testes práticos: Navisworks, OrçaBIM e QiVisus. A seleção foi baseada na maior quantidade de ocorrências durante a pesquisa, na disponibilidade de licenças de uso acadêmico, em funcionalidades únicas descritas pelos fornecedores e limitações de tempo disponível para o desenvolvimento do trabalho.

Posteriormente, foi realizada a modelagem dos elementos necessários ao processo de orçamentação das disciplinas de Arquitetura, Hidrossanitário e Elétrico (Figura 2).

A edificação modelada contém área projetada de 131,63 m<sup>2</sup> e área total construída de 526,52 m<sup>2</sup> distribuídos em 4 pavimentos com 2 apartamentos cada. O sistema construtivo adotado foi alvenaria estrutural de blocos de concreto.

A modelagem da estrutura foi realizada no *software* Autodesk Revit, enquanto as instalações hidrossanitárias e elétricas foram desenvolvidas no QiBuilder, da AltoQi, e posteriormente importadas no modelo arquitetônico por meio da extensão IFC. Devido às limitações de recursos, a estrutura não foi dimensionada em um *software* de cálculo e, portanto, os elementos estruturais como armaduras não foram representados.

É importante considerar também que, como a modelagem foi realizada com a prerrogativa de elaboração de orçamento, todos os elementos foram alimentados com informações específicas de seus materiais, suas descrições, suas dimensões, especificações, entre outros, desde o início do desenvolvimento. Assim, todos os itens do modelo são passíveis de interpretação, pelas ferramentas a serem analisadas, a partir destes parâmetros. Um exemplo dessa parametrização pode ser verificado na Figura 3, onde um tubo de esgoto é identificado por diversas especificações, como Diâmetro, Rede, Tipo e Comprimento, permitindo assim a seleção correta das composições orçamentárias na fase de Orçamentação. Eliminou-se, portanto, a limitação do modelo para orçamentação por falta de parametrização dos elementos, o que é uma ocorrência comum apontada por Oliveira *et al.* [7]. A modelagem passou ainda por verificações e correções pontuais a fim de chegar a um resultado mais detalhado e mais direcionado à obtenção do orçamento.

Tabela 1: Pesquisa das Ferramentas BIM

Ferramenta	Empresa	Tipo	Principais funcionalidades
Navisworks	Autodesk	Software	Controle de cronograma e custos (BIM 4D e 5D); Extração de quantitativos e outros tipos de medição; Detecção de colisão.
VICO	Trimble	Software	Ambiente de gestão com base de dados compartilhada (interoperabilidade); Atualização automática e em tempo real das informações; Elaboração, análise e ajuste de cronograma e orçamento.
PriMus	ACCA Software	Software	Elaboração de orçamento baseado em IFC; Medições automáticas; Análise e ajuste de cronograma e orçamento.
OrçaBIM	OrçaFascio	Plugin Revit	Integração automática e em tempo real com o modelo BIM; Interoperabilidade entre disciplinas; Parametrização ajustável.
Arquimedes	Multiplus	Software	Orçamento, planejamento e medição de projetos; Banco de dados compartilhado; Auxílio de compras e cotação.
iTWO CostX	RIB Software	Software	Orçamentação baseada em model BIM; Alimentação em tempo real de planilhas integradas; auto-revisão de informações.
Presto	RIB Software	Plugin Revit	Módulos de orçamento, planejamento e construção; Interação com outros softwares como MS Project e Primavera; Parametrização ajustável.
QiVisus	AltoQi	Software	Orçamentação a partir de modelo BIM; Rastreabilidade de objetos; Quantitativo de elementos não modelados; Parametrização ajustável.
Gryfus	Gryfus	Software	Interoperabilidade com Revit e Navisworks; Templates de modelagem focados em orçamentação; Ajuste da parametrização; Identificação automática de inconformidades nas composições.

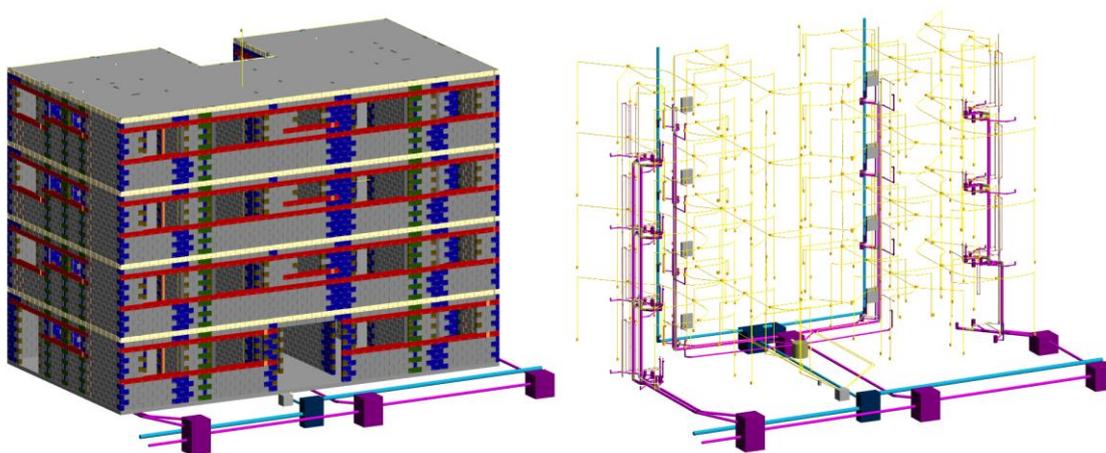


Figura 2: (a) Vista 3D da modelagem da Estrutura do empreendimento em estudo. (b) Vista 3D da modelagem do Hidrossanitário e Elétrico do empreendimento em estudo

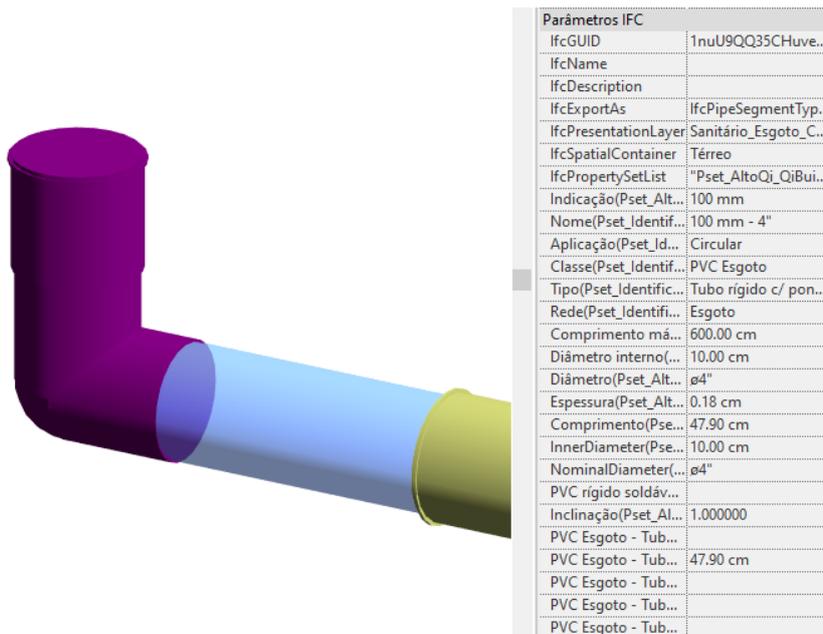


Figura 3: Tubulação de esgoto e suas propriedades

A terceira fase da metodologia consistiu na orçamentação do modelo nos *softwares* selecionados, com o objetivo de comparar os processos em cada um deles. Foi realizada uma análise de vários aspectos e características na utilização das ferramentas, ou seja, não apenas os resultados serão contrastados, mas também outros elementos como:

- Importação de IFC a fim de entender como se dá a entrada inicial de informação nos *softwares*;
- Processamento das informações, e como os *softwares* conseguem aproveitar as informações vindas do modelo 3D para organizar as configurações iniciais;
- Visualização do modelo 3D e como esta visualização auxilia na elaboração do orçamento;
- Como se dá a montagem de uma EAP dentro do *software*, para permitir organizar as saídas destes *softwares* da forma mais personalizada possível;
- Vinculação do modelo à EAP a partir da atribuição de informações da Estrutura Analítica aos objetos modelados;
- Parametrizações editáveis permitidas durante o processo de levantamento de quantidades, que permitem uma maior personalização das fórmulas de levantamento paramétrico;
- Vinculação de base de preços e o quão automatizada se dá essa atribuição;
- Edição e criação de composições, de forma a analisar o quanto o usuário pode personalizar as bases, permitindo maior assertividade no contexto de cada projeto.
- Soluções inovadoras, neste caso, mais voltado para quão automatizados os *softwares* são durante o processo de orçamentação;
- Como o *software* consegue facilitar a análise do orçamento a partir de resumos, tabelas, gráficos e relatórios;

Exportação do orçamento, pois o processo de elaboração deve continuar após a utilização dos *softwares*. Assim, foi analisado como se dá essa extração de informações.

## Resultados: aplicação de ferramentas BIM para orçamentação

**Autodesk Navisworks.** O processo de utilização do *software* Navisworks está exemplificado na Figura 4.

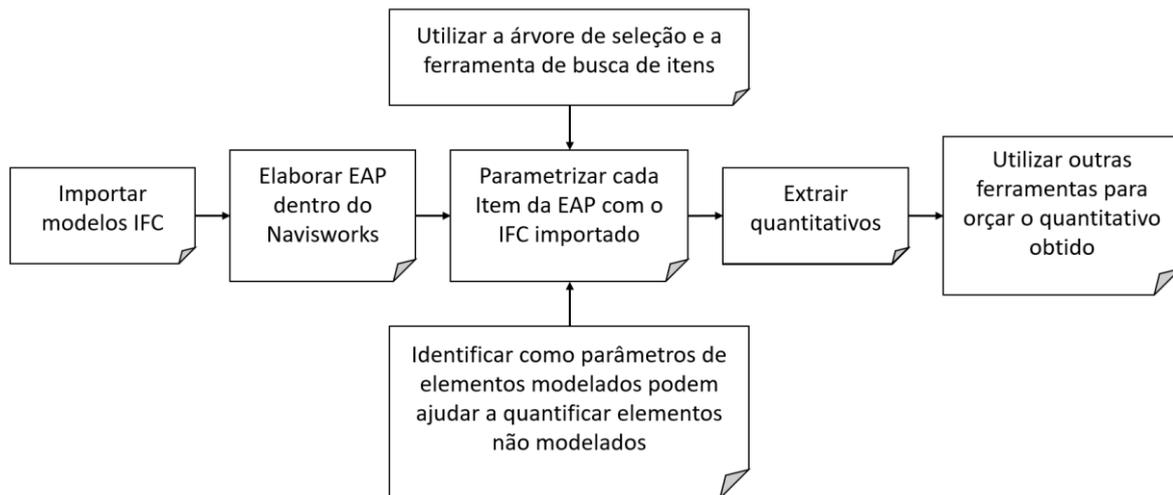


Figura 4: Processo de utilização do Navisworks

O Navisworks permitiu a importação do modelo em IFC para o seu ambiente virtual, porém, não foi possível atribuir composições de custo aos objetos BIM do modelo. O resultado do uso dessa ferramenta é que não é possível proceder para orçamentação dos itens dentro do próprio *software*, sendo necessário que o usuário utilize outros programas, como planilhas ou outras aplicações para atribuir preço e custo aos itens da EAP. Como a proposta deste estudo é a análise especificamente do Navisworks, não se prosseguiu para a análise de custos, tendo em vista que já foi possível verificar como esta ferramenta pode auxiliar durante a orçamentação.

Assim, o Navisworks caracteriza-se por ser uma ferramenta que fornece diversos recursos no processo de referência dos itens da EAP aos elementos importados pelo IFC, se tornando fácil o levantamento de quantitativos. Sua limitação está na impossibilidade de realizar a análise de custos a partir de tabelas referenciais como o SINAPI, por exemplo, sendo necessária a utilização de outras ferramentas e *softwares* para transformar os quantitativos em um orçamento. Tais argumentos também foram comentados por Araújo *et al.* [8] como não sendo apropriado para o modelo de orçamentação brasileiro.

**OrçaBIM (plug-in OrçaFascio).** O OrçaBIM é um *plug-in* desenvolvido pela OrçaFascio para instalação no Revit, da Autodesk. Pelo fato de ser um *plug-in*, não há necessidade de programas diferentes para a modelagem e para a orçamentação, o que pode ser apontado como um ponto negativo, visto que o orçamentista precisa ter a licença do *software* de projeto. O processo para utilizá-lo está exemplificado na Figura 5.

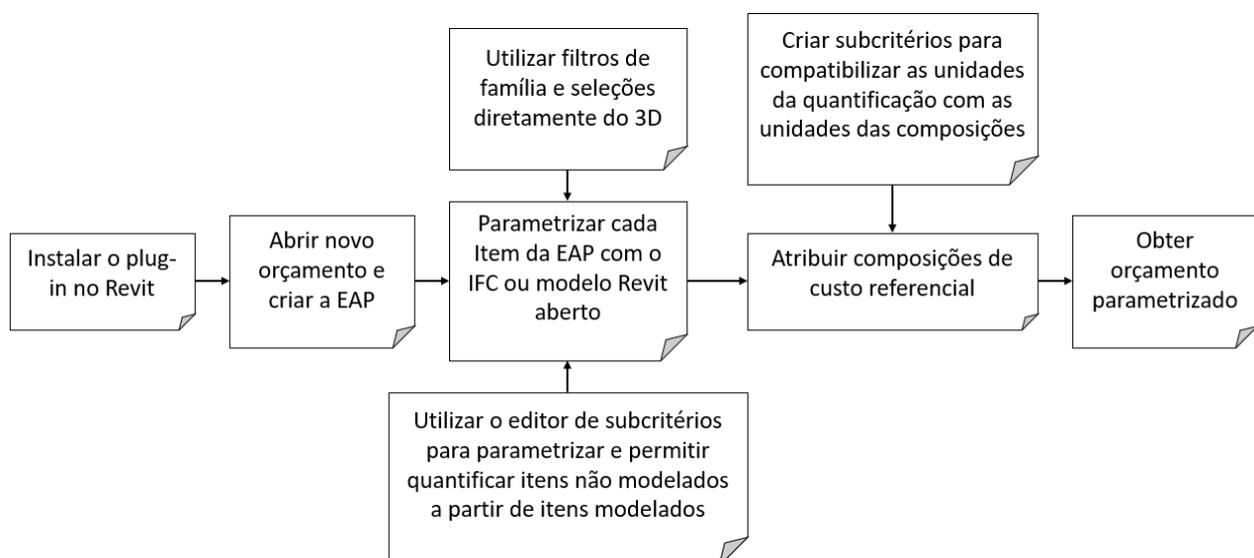


Figura 5: Processo de utilização do OrçaBIM

Durante o processo de orçamentação, o OrçaBIM se mostrou ser uma ferramenta de simples interface e manuseio, e eficaz. Trabalhar com as informações de forma coerente foi intuitivo pelo fato de o *plug-in* sempre fornecer prévias da quantidade total de itens contados nas seleções e qual o quantitativo parcial seguindo as regras e fórmulas definidas. Além disso, fornece ao usuário a análise do orçamento pelo navegador de internet, assim, o Revit não é sobrecarregado e, em casos extremos, não se perde o trabalho realizado ao salvar tudo em nuvem em tempo real.

**AltoQi QiVisus.** O QiVisus é um software comercializado pela AltoQi e auxilia na elaboração de orçamentos a partir da quantificação baseada em parâmetros de modelos IFC. O fluxo para a utilização do software foi exemplificado na Figura 6.

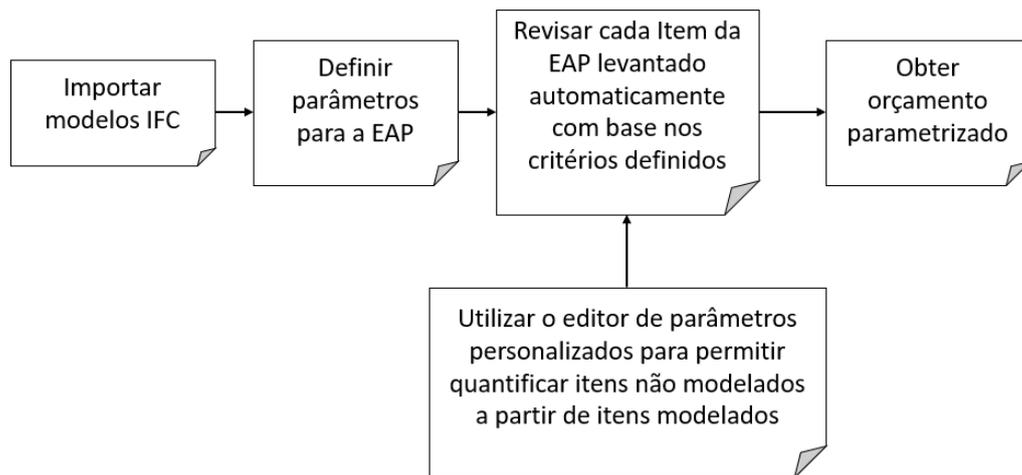


Figura 6: Processo de utilização do QiVisus

Frente ao processo apresentado, é possível definir o QiVisus como a ferramenta com fluxo de trabalho mais simples, porque traz algumas automatizações como a montagem de EAP e a atribuição de referencial de custo, de forma a facilitar boa parte do trabalho do orçamentista. Porém as automatizações, da mesma forma que trazem facilidades, também trazem alguns desafios, como a dificuldade em montar uma EAP com os itens e subitens desejados, o que pode trazer problemas quando em contextos de inflexibilidade quanto à estrutura. Outro ponto de atenção é a limitação no acesso de parâmetros de geometria ao realizar quantificação por fórmulas personalizadas, o que pode dificultar a quantificação quando o modelo não atende aos requisitos mínimos de informação requisitados pelo programa.

**Comparação e Análise.** Na Tabela 2, foi identificado de forma resumida, para cada recurso, a ferramenta que teve melhor desempenho e a que demonstrou maiores limitações.

Tabela 2: Tabela de desempenho das ferramentas analisadas

Item analisado	Ferramenta com melhor desempenho	Ferramenta com mais limitação
Importação de IFC	OrçaBIM, com a integração com o Revit, que por sua vez oferece mais desempenho na manipulação de arquivos IFC.	-
Processamento das informações	QiVisus, que permite uma boa manipulação de composições e edição específica de extrações de quantitativos.	Navisworks, pois não possui ferramentas nativas para a atribuição de composições aos quantitativos obtidos
Visualização do modelo 3D	OrçaBIM, com a sua integração com Revit, que por sua vez tem vastas opções para a visualização de modelos 3D	QiVisus teve maiores dificuldades de desempenho durante a visualização do modelo, mesmo com computador com configurações recomendadas e modelo relativamente pequeno.

Tabela 2: Tabela de desempenho das ferramentas analisadas (continuação)

Montagem de EAP	Navisworks trouxe a interface mais simples e eficaz na elaboração da EAP	QiVisus, embora tenha uma proposta de automatizar a criação da EAP, a edição dos parâmetros para essa automatização não é simples
Vinculação do modelo à EAP	Navisworks possui as melhores opções para filtrar o modelo, sob a ótica dos parâmetros IFC, para obtermos apenas os itens requeridos para orçamento	QiVisus traz ferramentas simples mas a limitação na visualização do modelo 3D dificulta a vinculação de itens
Parametrização editável	Navisworks traz a interface mais simples e intuitiva para edição de fórmulas e parâmetros dentro de cada extração de quantitativo	QiVisus mostrou maiores complexidades nesse aspecto, pois permite apenas edição de parâmetros específicos na extração e usar fórmulas baseadas nas informações dos IFCs não é permitida de forma direta
Vinculação de Base preços	OrçaBIM por uma ótima relação com as bases de preços mais utilizadas e permite a inclusão rápida de composições personalizadas	Navisworks, pois não possui ferramentas nativas para a atribuição de composições aos quantitativos obtidos
Edição e criação de composições	OrçaBIM por uma ótima relação com as bases de preços mais utilizadas e permite a inclusão rápida de composições personalizadas	Navisworks, pois não possui ferramentas nativas para a atribuição de composições aos quantitativos obtidos
Soluções inovadoras	QiVisus, embora tenha algumas limitações atualmente, é a ferramenta que mais busca a automatização do trabalho do orçamentista	-
Análise do orçamento	OrçaBIM é a ferramenta que mais oferece análises dos orçamentos, com curvas ABC, inclusão de BDI, comparativos de itens e extração de tabelas	Navisworks, pois não possui ferramentas nativas para a atribuição de composições aos quantitativos obtidos
Exportação de orçamento	OrçaBIM por permitir facilmente a extração de qualquer informação em formatos de planilhas e por ser executado também dentro dos navegadores de internet, que permite ainda mais opções na extração de informações	Navisworks, pois não possui ferramentas nativas para a atribuição de composições aos quantitativos obtidos

A partir da tabela comparativa, é possível verificar que cada ferramenta tem suas particularidades e podem ser as melhores escolhas em situações específicas.

O Navisworks é um software mais recomendado a utilizações onde o orçamentista já tenha outras ferramentas de análise de custos e que a necessidade seja a extração de quantitativos, além de proporcionar outras funções de planejamento e gestão de projetos. Isso se deve ao fato de que a ferramenta não possui suporte à atribuição de custos, sobretudo nos moldes brasileiros de orçamentação.

O OrçaBIM demonstra ser mais simples e direcionado na elaboração do orçamento em si. Embora não ofereça muitas opções de seleção de elementos, pode ser indicado para situações nas quais o orçamentista não tem à disposição várias ferramentas e precisa trabalhar com tabelas de referências de custos, seja ela o SINAPI ou tabelas próprias. Uma desvantagem deve-se ao fato de que o orçamentista precisa também da licença do software de projeto (Autodesk Revit) e também o conhecimento, ainda que básico sobre o programa é requerido. Vale ressaltar que o desempenho quanto à visualização do modelo 3D ou ifc não é do plug-in em si, e sim do Autodesk Revit.

O QiVisus tem uma proposta mais automatizada e tenta aproveitar ao máximo as interações que os IFCs permitem e, mesmo exigindo mais atenção do orçamentista durante o processo de conferência, pode ser utilizado por profissionais que trabalhem sempre com modelos mais bem

alimentados com informação ou que venham de outros softwares de distribuição da AltoQi, que facilitam a obtenção de resultados mais rápidos.

## Conclusão

Esta pesquisa realizou um trabalho aplicado de modelagem e orçamentação de uma edificação para tentar entender, de forma prática, quais eram as dificuldades e facilidades que cada ferramenta traz para uma situação real de orçamentação.

Como resultado, o trabalho apresenta um comparativo de ferramentas BIM 5D no contexto da orçamentação. Cada uma delas apresentou vantagens e desvantagens.

O Navisworks, como já citado, não possui atribuição de custos baseados em referências de preços e custos, porém, se mostra uma ferramenta muito eficaz na identificação precisa e rápida de quantitativos de insumos, o que não resolve em sua totalidade o trabalho de um orçamentista, mas é um excelente primeiro passo. O OrçaBIM possui interfaces simples, e constitui uma excelente ferramenta para orçamentistas que precisam trabalhar com softwares menos exigentes em termos de hardware. Além de que a ferramenta trabalha em nuvem, o que corrobora para a rastreabilidade do produto. Por fim, o QiVisus, ferramenta com proposta de trabalho bem diferente das anteriores, traz uma abordagem de automatização nas extrações de quantidades e atribuição de custos, isso porque não se define EAP, apenas as regras para que o software a monte de forma independente. Dessa forma, o orçamentista apenas deve proceder para realizar ajustes no orçamento. Embora a proposta seja muito interessante, a implicação é que o orçamentista deve ter mais experiência e mais atenção na utilização desta ferramenta, tendo em vista que, independentemente das regras de EAP estarem certas ou não, ele mostrará um resultado ao usuário.

Frente às comparações feita por este trabalho cabe ao leitor entender quais são as problemáticas que quer resolver em seus processos de orçamentação para, a partir das informações aqui apresentadas, adotar alguma das ferramentas analisadas ou entender ser necessário buscar outras soluções disponíveis no mercado.

## Referências

- [1] Rahman, I. A.; Memon, A. H.; Karim, A. T. A., *Significant Factors Causing Cost Overruns in Large Construction Projects in Malaysia*, Journal of Applied Sciences, 13(2), (2013) 286-293.
- [2] Doloi, H., *Cost Overruns and Failure in Project Management: Understanding the Roles of Key Stakeholders in Construction Projects*, Journal of Construction Engineering and Management, 139(3), (2013) 267-279.
- [3] Babatunde, S.O.; Perera, S.; Ekundayo, D., *An investigation into BIM-based detailed cost estimating and drivers to the adoption of BIM in quantity surveying practices*, Journal of Financial Management of Property and Construction, 25 (1), (2019) 61-81.
- [4] Eastman, C. M.; Sacks, R.; Liston, K; Teicholz, P. (2018), *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. Livro. New Jersey: Wiley & Sons.
- [5] Fenato, T. M. *et al.*, *Método para elaboração de orçamento operacional utilizando um software de autoria BIM*. Ambiente Construído, v. 18, n. 4, (2018) 279-299, DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212018000400305>.
- [6] Merkel, D.C.; Ioshimoto, E.; Souza, U. E. L., *Como incentivar o uso do BIM para auxiliar a quantificação de serviços em orçamentos*. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 17., 2018, Foz do Iguaçu. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2018.
- [7] Oliveira, R. B. de; Araújo, L. G.; Carvalho, M. T. M.; Blumenschein, R. N., *Critérios básicos de modelagem para orçamentação em BIM de um projeto arquitetônico*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO E COMUNICAÇÃO NA CONSTRUÇÃO, 3., 2021, Uberlândia. Anais [...]. Porto Alegre: ANTAC, (2021) 1-9,

Disponível em: <https://eventos.antac.org.br/index.php/sbtic/article/view/612>. Acesso em: 3 ago. 2021.

- [8] Araújo, L. *et al.*, *Orçamentação no processo BIM: cenário atual da construção civil brasileira e lições aprendidas*. In: CONGRESSO DE CONSTRUÇÃO CIVIL - CONSTRUÇÃO 2020, 2020, Brasília. Anais [...] Brasília. Universidade de Brasília, (2020) 188-194. ISBN: 978-65-86503-22-7.

## Base de dados: Contratação pública em Portugal entre 2015 e 2022

JACQUES de SOUSA Luís<sup>1,a</sup>, POÇAS MARTINS João<sup>2,b</sup> e SANHUDO Luís<sup>3,c</sup>

<sup>1</sup>Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 4200-465 Porto, Portugal

<sup>2</sup> CONSTRUCT/GEQUALTEC, FEUP – DEC, Porto, Portugal

<sup>3</sup> BUILT CoLAB – Collaborative Laboratory for the Future Built Environment, 4150-003 Porto, Portugal

<sup>a</sup>up201604212@fe.up.pt, <sup>b</sup>jppm@fe.up.pt, <sup>c</sup>luis.sanhudo@builtcolab.pt

**Palavras-chave:** Base de dados, Database, Contratação Pública, Procurement, Concurso, Tender.

**Resumo.** Atualmente, o setor da Arquitetura, Engenharia e Construção (AEC) exhibe uma enorme escassez de informação sistematizada, sobre a forma de bases de dados (BD). Esta carência apresenta-se como um crescente obstáculo à implementação de novas metodologias no setor, que apresentam já um elevado sucesso noutras indústrias. Esta escassez contrasta ainda com o funcionamento intrínseco do setor AEC, que ao longo de todo o processo construtivo gera um elevado volume de documentação. Nomeadamente, o procedimento de contratação e concurso público é dos procedimentos mais bem documentados ao longo deste processo, dispondo de um acesso aberto a todos os dados a ele associados, ainda que careçam de tratamento e sistematização. Com o objetivo de contribuir para a sistematização da informação do setor, o presente trabalho resume os passos desenvolvidos para a obtenção e tratamento destes dados, através de um algoritmo scraping, disponibilizando a BD obtida. A BD resultante é composta por 5214 contratos únicos, caracterizados com 37 propriedades distintas. Ao longo do artigo são identificadas oportunidades futuras de desenvolvimento que podem ser suportadas por esta BD, aplicando técnicas de análise estatística descritiva e algoritmos de inteligência artificial, nomeadamente, machine learning (ML). Refere-se ainda a possibilidade de continuar o processo de expansão da BD e de a traduzir para língua inglesa de modo a ampliar o âmbito das análises a realizar.

### Introdução

Durante a fase de concurso de uma empreitada pública, são emitidos diferentes documentos que descrevem o projeto a executar. As entidades que pretendam participar nestes concursos devem estudar as variáveis que afetam a empreitada como: o preço base, o tempo de submissão ou o tipo de construção; e adaptar a sua proposta a cada caso específico. A entidade contratante pondera cada proposta e determina a quem adjudicar com base numa série de fatores, como: o preço, o prazo ou a valia técnica. Assim, se forem tomadas as diligências necessárias, existe nesta fase uma enorme oportunidade de aglomeração de dados. Contudo, devido à natureza do processo de contratação, extrair informação consistente destes dados é um desafio, tornando a sua análise demorada e inconsistente, uma vez que, a qualidade dos dados depende frequentemente do indivíduo que a submete.

A emergência da metodologia *Big Data* tem tido um impacto disruptivo em várias indústrias, afetando também o setor da AEC [1]. Nos últimos anos, o acesso, armazenamento e uso de dados tem apresentado uma crescente importância neste setor, em grande parte impulsionada pela disseminação de novas tecnologias que permitem uma expedita geração de elevados volumes de dados.

Esta nova magnitude de informação amplia significativamente o âmbito da sua utilização [2], sendo que a sua disponibilização sobre a forma de BDs possibilita que investigadores e técnicos

tomem melhores decisões, suportadas pelos dados históricos armazenados [3]. Adicionalmente, estatística descritiva e ML são exemplos de tecnologias intimamente ligadas e dependentes da disponibilização destes grandes volumes de dados, sendo que o acesso a esta informação representa a eliminação do principal bloqueio ao desenvolvimento e aplicação destas tecnologias no setor AEC [1, 4, 5] – permitindo o usufruto das suas vantagens.

Contudo, a adoção destas tecnologias no setor AEC encontra-se num estado de desenvolvimento relativamente atrasado quando comparado com setores análogos [1, 6], em grande parte devido ao seu difícil acesso, devido à resistência, por parte dos intervenientes, em partilhar informação, frequentemente considerada de carácter confidencial. Neste sentido, recentemente, têm existido esforços crescentes para disponibilizar BDs focadas em diferentes âmbitos do setor, como: renovação de edifícios [7]; habitação e urbanismo [8], imobiliário [9]; sismologia em edifícios [10]; materiais de construção [11]; eficiência energética [12]; e análise do ciclo de vida [13]. Este documento suplementa este estado da arte com a publicação de uma BD relativa ao processo de contratação pública e ao desempenho dos projetos públicos.

O restante artigo encontra-se organizado em quatro capítulos. O Capítulo 2 esclarece a metodologia para a obtenção, processamento e publicação dos dados. O Capítulo 3 caracteriza a amostra obtida e descreve todas as variáveis constituintes da BD. O Capítulo 4 sugere futuros caminhos de pesquisa e, por fim, o Capítulo 5 conclui o trabalho, resumindo os principais resultados obtidos.

## Metodologia

Conforme ilustrado na Figura 1, a metodologia inicia-se com a recolha de informação a partir do Portal Base – o repositório nacional de procedimentos de concursos de contratação pública. Esta recolha restringiu-se a contratos com data de fecho entre 2015 e 2022, bem como a empreitadas de obras públicas. De realçar que a exclusão de contratos anteriores a 2015 teve como fundamentação as alterações ao Diário da República Eletrónico (DRE), que criam desassociações de hiperligações ao Portal Base.

Desta filtragem resultaram 5253 contratos, cujos dados foram extraídos e armazenados através de um *webscraper* criado para o efeito. Entre os diferentes campos de valores extraídos, pode existir o link URL para o local de publicação do anúncio do procedimento, publicado no DRE. Caso exista, o PDF do anúncio é também descarregado e as suas informações coletadas e armazenadas através de um *PDF scraper*. Caso não exista, é armazenada informação que indica a falta desse documento.

De seguida, os dados contratuais provenientes do Portal Base, e os dados do anúncio do procedimento provenientes do DRE, são compilados num único ficheiro json, representativo de toda a informação obtida acerca dos 5253 contratos identificados.

Por fim, para publicação da BD, foi realizada uma exportação do ficheiro json para Excel, onde os dados foram processados para homogeneização da informação, limpeza de dados errados e/ou omitidos e remoção de *outliers*. Deste processamento resultaram 5214 contratos, caracterizados por 37 variáveis, que dão origem à BD disponibilizada neste artigo, sobre o formato *xlsx*. Os conteúdos desta BD são explorados no capítulo que se segue.

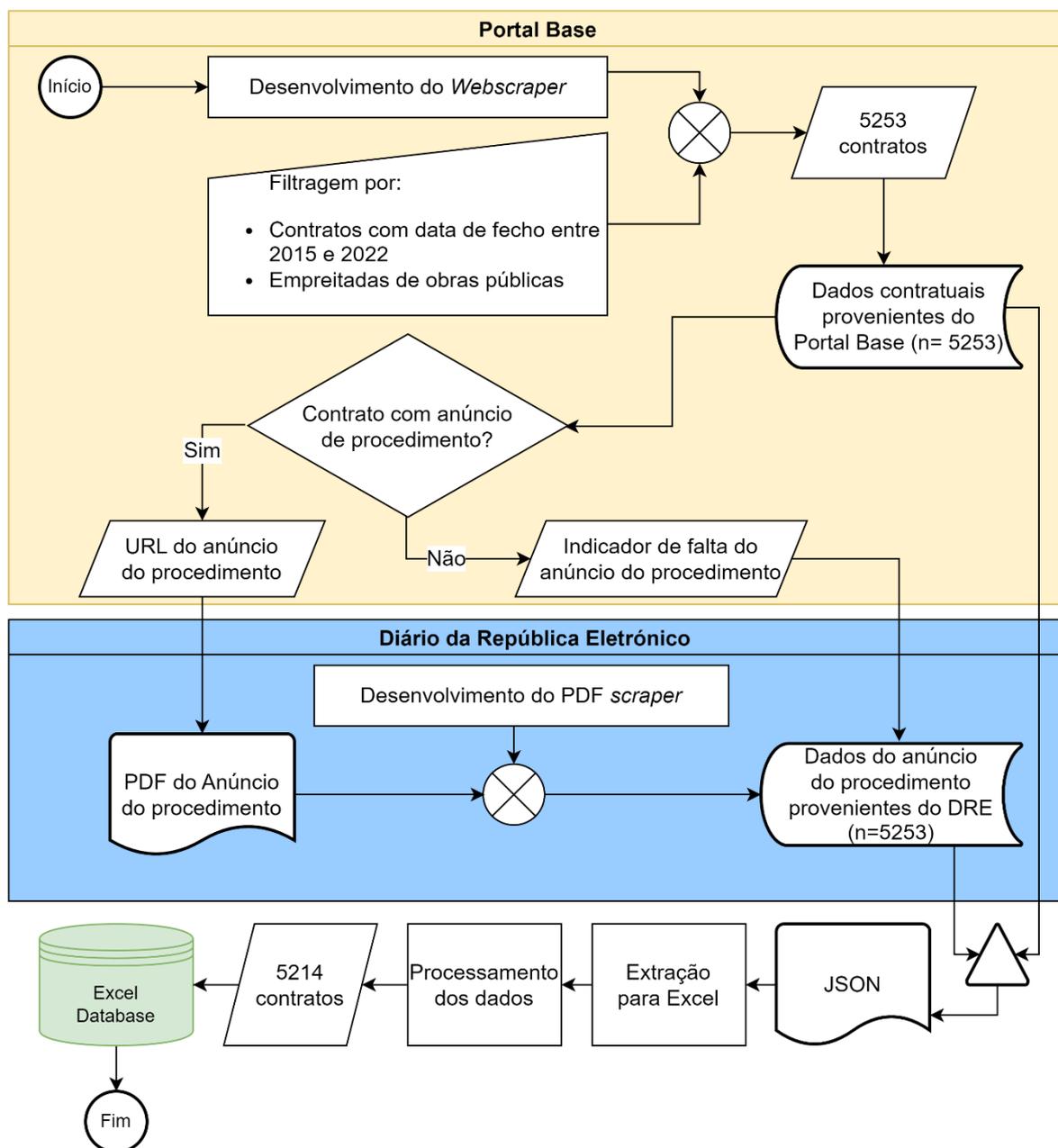


Figura 1: Metodologia para a obtenção e processamento dos dados

### Caracterização da amostra

As BD disponibilizada é composta por 5214 registos (contratos com propriedades únicas), cada um caracterizado por um conjunto de 37 campos (características das propriedades ou outras variáveis). A Tabela 1 caracteriza estes campos para melhor compreensão da BD, apresentando o seu:

- nome – título do campo na respetiva coluna do ficheiro Excel;
- descrição – breve descrição do conteúdo de cada campo;
- esquema de codificação – formato do valor de cada campo (i.e., inteiro, texto, lógico, data, monetário, percentagem ou alfanumérico);
- unidade de medição – unidade de medição do valor de cada campo.

Tabela 1: Explicação das propriedades da base de dados

Nome	Descrição	Esquema de Codificação	Unidade de medição
ID	Número de Identificação	Inteiro	N/A
Descrição Breve	Descrição breve do objeto do contrato	Texto	N/A
Cpvs	Código Cpvs	Texto	N/A
Designação Cpvs	Designação do código Cpvs	Texto	N/A
Critério Ambiental	Se o critério ambiental foi considerado no concurso (VERDADEIRO-FALSO)	Lógico	N/A
Ano de publicação	Ano de publicação do concurso em Diário da República	Data	N/A
Ano de fecho	Ano de fecho do processo no Portal Base	Data	N/A
País	País de execução da obra	Texto	N/A
Município	Município de execução da obra	Texto	N/A
Distrito	Distrito da execução da obra	Texto	N/A
Código de Distrito	Código identificador de distrito, organizado por ordem alfabética e numerado de 1 a 20	Inteiro	N/A
Prazo de submissão	Prazo de submissão da proposta	Inteiro	Dias
Data de celebração	Data de celebração do Contrato	Data	dd-mm-aaaa
Data de fecho	Data de fecho do processo no Portal Base	Data	dd-mm-aaaa
Diferença entre data de celebração e fecho	Diferença entre data de celebração e fecho	Inteiro	Dias
Prazo de execução	Prazo previsto para a execução da obra	Inteiro	Dias
Preço Base	Preço base para propostas a concurso	Monetário	€
Preço Inicial	Preço inicial acordado entre adjudicatário e adjudicante	Monetário	€
Categoria Preço I.	1 - Entre 0 e 250 mil; 2 - entre 250 mil e 1 Milhão; 3 – acima de 1 Milhão	Inteiro	N/A
Preço Efetivo	Preço efetivo no final da obra	Monetário	€
Diferença de preço	Diferença entre preço inicial e preço efetivo	Monetário	€
Percentagem da Diferença de preço	Preço Inicial dividido pelo Preço Efetivo	Percentagem	Percentagem
Critério de adjudicação	Critério de adjudicação utilizado classificar as propostas durante o concurso público	Texto	N/A
Categoria do Critério de adjudicação	1 - Critério multifator; 2 - Critério preço mais baixo; 0 - Critério de adjudicação em falta	Inteiro	N/A
Classificação do critério multifator	Peso do fator “preço” no critério multifator	Percentagem	Percentagem
Caução	Valor da caução, se aplicável	Alfanumérico	Percentagem, lógico
Publicado no Jornal EU	Se o contrato foi publicado em jornal da união europeia	Lógico	N/A
Tipo de fim do contrato	1 – Cumprimento integral do contrato 2 – Cumprimento não integral do contrato	Texto	N/A
Número de concorrentes	Número de concorrentes do concurso	Inteiro	N/A
Envolve aquisição conjunta	Se o contrato envolve aquisição por várias entidades (VERDADEIRO-FALSO-N/A)	Lógico	N/A
Adjudicado por uma central de compras	Se o contrato foi adjudicado por uma central de compras (VERDADEIRO-FALSO-N/A)	Lógico	N/A
Celebração de um acordo quadro	Se o contrato foi celebrado por um acordo quadro (VERDADEIRO-FALSO-N/A)	Lógico	N/A
Leilão eletrónico	Se o contrato foi executado com recurso a leilão eletrónico (VERDADEIRO-FALSO-N/A)	Lógico	N/A
Adotada uma fase de negociação	Se foi adotada uma fase de negociação (VERDADEIRO-FALSO-N/A)	Lógico	N/A
Contratação por lotes	Se a contratação se realizou por lotes (VERDADEIRO-FALSO-N/A)	Lógico	N/A
Justificação para mudança de prazo	Justificação para mudança de prazo (formato livre)	Texto	N/A
Justificação para mudança de preço	Justificação para mudança de preço (formato livre)	Texto	N/A

De realçar que dos 37 campos, 6 foram criados pelos autores, à posteriori, através da associação entre propriedades ou para classificação das mesmas. A seguinte lista enumera-as e justifica a sua criação:

- “Código de Distrito” – Facilita a identificação do distrito;
- “Diferença entre data de celebração e fecho” - Permite determinar a pontualidade com que as informações finais são subscritas no Portal Base;
- “Categoria Preço I.” – Separação arbitrária dos autores com intuito de separar diferentes obras por dimensão com vista a análises estatísticas;
- “Diferença de preço” – Permite determinar o desempenho da obra;
- “Percentagem da Diferença de preço” – Permite determinar a proporção dos deslizes para isolar os casos significativos;
- “Categoria do Critério de adjudicação” – Categoria dada tendo em conta o critério utilizado, se multifator, exclusivamente económico ou em falta.

### **Disponibilização da base de dados**

A BD encontra-se disponível para acesso ao público via github (<https://github.com/LuisJSousa/Portuguese-Public-Procurement-Database>) mediante pedido formal aos autores deste trabalho. Os utilizadores terão acesso a duas versões: uma versão com a informação tratada em formato xlsx (i.e., com a constituição apresentada no Capítulo 3 desta comunicação) e outra com os dados brutos em formato json.

O repositório indicado contém ainda um conjunto de documentos de suporte: uma tabela de apoio à consulta do ficheiro xlsx; um PDF com a nomenclatura do ficheiro json; e um ficheiro com código Python para suporte à consulta do ficheiro json. O código fornece exemplos de codificação simples para extração de dados e o tipo de informação/propriedades que podem ser obtidos a partir do ficheiro. A estrutura de dados proposta permite obter informações adicionais detalhadas sobre os contratos da BD.

### **Conclusão**

Dados fidedignos que traduzem as tendências do mercado da Construção são um recurso escasso na indústria da Construção. Para o setor AEC acompanhar os desenvolvimentos tecnológicos de indústrias semelhantes nas áreas da estatística descritiva e ML, são necessários esforços no sentido de gerar, armazenar e partilhar dados.

O presente documento aborda esta realidade de forma direta através da publicação de uma BD relativa à contratação pública no setor. Através do desenvolvimento de algoritmos de webscraping e PDF scraping, em Python, foi possível aceder, armazenar e processar a informação contida no Portal Base, bem como a informação contida nos anúncios dos procedimentos publicados no DRE. O grande volume de dados reunidos foram estruturados num ficheiro Excel, constituído por 5214 contratos únicos com 37 propriedades diferentes.

O acesso a uma base extensa de dados bem estruturada abre portas para o desenvolvimento de trabalhos de investigação em diferentes disciplinas, como se refere no Capítulo 1. Deste modo, prevê-se que trabalhos futuros realizem a análise estatística descritiva de toda a informação recolhida, com o intuito de realizar o benchmarking das obras públicas em Portugal e de identificar tendências e melhores práticas no momento da adjudicação para a indústria da Construção. Adicionalmente, prevê-se a tradução desta BD para língua inglesa e subsequente partilha com a comunidade científica internacional, com o objetivo de facultar estes dados a um maior leque de investigadores. Por fim, é ainda previsto que esta BD sirva de repositório para treino e avaliação de algoritmos de previsão (baseados em ML) com duas vertentes distintas: (1) identificação de features no texto; e (2) previsão do sucesso de uma obra, em função da informação do contrato.

A disponibilização da BD ao público é um incentivo ao trabalho colaborativo, permitindo que outros investigadores possam explorar diferentes aplicações para os dados recolhidos.

## 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). Este trabalho é também cofinanciado pelo Fundo Social Europeu (FSE), através do Programa Operacional Regional do Norte (Norte 2020) [Referência de Financiamento: NORTE-06-3559-FSE-000176].

## Referências

- [1] H. S. Munawar *et al.*, *Big Data in Construction: Current Applications and Future Opportunities*, Big Data and Cognitive Computing, vol. 6, no. 1, (2022) 18.
- [2] Phaneendra, Seethamraju and E. M. Reddy, *Big Data - Solutions for Rdbms Problems - a Survey*, 2013.
- [3] W. Xu *et al.*, *A Personalized Information Recommendation System for R&D Project Opportunity Finding in Big Data Contexts*, Journal of Network and Computer Applications, vol. 59, (2016) 362-369, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2015.01.003>.
- [4] H. H. Elmousalami, *Data on Field Canals Improvement Projects for Cost Prediction Using Artificial Intelligence*, Data in Brief, vol. 31, (2020) 105688, doi: [10.1016/j.dib.2020.105688](https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105688).
- [5] L. Jacques de Sousa *et al.*, *Algoritmos De Classificação De Texto Na Automatização Dos Processos Orçamentação*, presented at the 4º Congresso Português de ‘Building Information Modelling’, Braga, Portugal, 2022.
- [6] S. M. E. Sepasgozar and S. Davis, *Construction Technology Adoption Cube: An Investigation on Process, Factors, Barriers, Drivers and Decision Makers Using Nvivo and Ahp Analysis*, Buildings, vol. 8, no. 6, (2018) 74.
- [7] T. Stout *et al.*, *United States Department of Defense (Dod) Real Property Repair, Alterations, Maintenance, and Construction Project Contract Data: 2009–2020*, Data in Brief, vol. 32, (2020) 106128, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106128>.
- [8] A. O. Afolabi *et al.*, *Statistical Exploration of Dataset Examining Key Indicators Influencing Housing and Urban Infrastructure Investments in Megacities*, Data in Brief, Data paper vol. 18, (2018) 1725-173, doi: [10.1016/j.dib.2018.04.089](https://doi.org/10.1016/j.dib.2018.04.089).
- [9] P. Bonifaci and S. Copiello, *Real Estate Market and Building Energy Performance: Data for a Mass Appraisal Approach*, Data in Brief, vol. 5, (2015) 1060-1065, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2015.11.027>.
- [10] X. Guan M.Eeri *et al.*, *A Database of Seismic Designs, Nonlinear Models, and Seismic Responses for Steel Moment-Resisting Frame Buildings*, Earthquake Spectra, Data paper vol. 37, no. 2, (2021) 1199-1222, doi: [10.1177/8755293020971209](https://doi.org/10.1177/8755293020971209).
- [11] G. Guven *et al.*, *A Construction Classification System Database for Understanding Resource Use in Building Construction*, Scientific Data, Data paper vol. 9, (2022) no.1, Art no. 42, doi: [10.1038/s41597-022-01141-8](https://doi.org/10.1038/s41597-022-01141-8).
- [12] T. M. Uidhir *et al.*, *Residential Stock Data and Dataset on Energy Efficiency Characteristics of Residential Building Fabrics in Ireland*, Data in Brief, vol. 29, (2020) 105247, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.105247>.
- [13] A. Kortazar *et al.*, *Dataset for the Life Cycle Assessment of the High Speed Rail Network in Spain*, Data in Brief, vol. 36, (2021) 107006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2021.107006>.

---

# CAPÍTULO 5

---

PATOLOGIA E REABILITAÇÃO

## Termografia de infravermelhos para análise de humidade em paredes – Ensaios preliminares e perspetivas futuras

DAFICO Letícia C. M.<sup>1, a</sup>, BARREIRA Eva<sup>2, b</sup>, ALMEIDA Ricardo M. S. F.<sup>3, c</sup>,  
VICENTE Romeu S.<sup>4, d</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto,  
Rua Dr Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal

<sup>2</sup>CONSTRUCT-LFC, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia (FEUP),  
Universidade do Porto, Rua Dr Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal

<sup>3</sup>Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Viseu, Campus Politécnico de  
Repeses 3504-510 Viseu, Portugal

<sup>4</sup>RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de  
Santiago 3810-193 Aveiro, Portugal

<sup>a</sup>up201911110@up.pt, <sup>b</sup>barreira@fe.up.pt, <sup>c</sup>ralmeida@estv.ipv.pt, <sup>d</sup>romvic@ua.pt

**Palavras-chave:** Termografia de Infravermelhos, Humidade, Diagnóstico Automatizado.

**Resumo.** Defeitos relacionados à humidade representam 70% das patologias reportadas em edificações, comprometendo a durabilidade de soluções e componentes e a médio prazo o conforto dos utilizadores. A termografia de infravermelhos (TIV) é uma técnica que possui grande potencial para mapear a humidade em edificações, mas carece de critérios para análises quantitativas que correlacionem diferenças de temperatura superficial com o teor de humidade. Apesar dos recentes avanços na utilização de métodos computacionais e técnicas de ensaio para automatizar a deteção de defeitos em edificações, o uso destes para análise de problemas associados à presença de humidade não está consolidado. Este trabalho apresenta os resultados de ensaios preliminares realizados com a TIV e o método gravimétrico para avaliar a correlação entre o gradiente de temperatura e o teor de humidade de alvenarias e analisar o gradiente térmico de regiões húmidas em diferentes condições ambientais. Análises estatísticas mostraram que a ordem de magnitude do gradiente de temperatura que indica altos teores de humidade é substancialmente diferente nos cenários analisados. Também são apontadas as limitações do uso da técnica e as indicações de pesquisas futuras que podem ser conduzidas para automatizar a identificação de defeitos relacionados à humidade em edificações, reduzindo o grau de subjetividade no diagnóstico de defeitos.

### Introdução

A humidade é uma das principais causas de degradação de elementos construtivos e a complexidade do fenómeno envolvido na humidificação e secagem dos materiais dificulta a interpretação dos resultados durante a inspeção de edificações. Um diagnóstico adequado de patologias relacionadas à humidade é importante para garantir a durabilidade das edificações e para assegurar o conforto dos usuários e a qualidade do ambiente interno, uma vez que altos teores de humidade podem levar à redução da performance térmica, à cristalização de sais e até mesmo à redução da resistência à compressão, bem como ao crescimento de mofo, aumentando o risco de infeções respiratórias dos usuários [1-6].

As técnicas escolhidas para detetar a presença de humidade devem proporcionar resultados rápidos e de fácil interpretação e permitir a definição da extensão do dano e a sua evolução ao longo do tempo [7]. O diagnóstico de defeitos relacionados à humidade pode ser feito com técnicas usuais, como o método gravimétrico, que consiste na extração de amostras, pesagem e secagem destas, fornecendo resultados altamente confiáveis [8], ou com métodos não destrutivos, como as técnicas baseadas na medição das propriedades elétricas dos materiais (método dielétrico, micro-

ondas, tomografia de impedância elétrica), métodos químicos (método do papel indicador), método baseado na medição das propriedades térmicas (termografia infravermelha) e métodos com radiação (ressonância magnética nuclear e atenuação de raios gama) [2, 9].

A termografia de infravermelhos (TIV) pode ser utilizada para mapear a distribuição de umidade nos materiais de construção, pois mudanças no teor de umidade dos materiais estão relacionadas a mudanças em sua temperatura superficial, conforme três fenômenos físicos: resfriamento evaporativo, reduzida resistência térmica e elevada capacidade de armazenamento de calor [1].

O resfriamento evaporativo ocorre porque a evaporação superficial é uma reação endotérmica que reduz a temperatura da superfície. Quando o teor de umidade do material é superior à umidade do ambiente, ocorre a evaporação, o que leva à redução na temperatura superficial, logo, na ocorrência apenas desse fenômeno, áreas com altos teores de umidade aparecerão nas imagens térmicas com temperaturas menores do que áreas mais secas [10]. Os fatores que mais influenciam na evaporação superficial são a umidade relativa do ambiente próximo à superfície, a temperatura do ar e o teor de umidade, teor de sais solúveis e outras propriedades físico-químicas do material [11, 12].

Em relação à redução da resistência térmica, sabe-se que o calor específico e a condutibilidade térmica da água são superiores àqueles dos materiais secos. Portanto, quando há água nos poros dos materiais, sua densidade, calor específico e condutibilidade térmica aumentam [12] e a resistência térmica diminui. Quando há fluxo de calor, será criado um padrão térmico heterogêneo com diferentes temperaturas superficiais entre as regiões secas e úmidas [1].

Além disso, os materiais úmidos respondem mais devagar a mudanças na temperatura do ar do que os materiais secos. Com base nesse princípio, o aquecimento de uma superfície seca ocorre mais rapidamente do que o aquecimento de uma superfície úmida e a taxa de resfriamento na região seca também é maior do que em uma região úmida [1].

A TIV é uma técnica muito utilizada para identificar umidade e outros defeitos em edificações devido à facilidade de uso e ao baixo custo, tempo e esforço para a sua utilização [13]. Porém, apesar da sua aplicabilidade para detectar umidade, existe uma lacuna na literatura quanto à análise quantitativa que correlaciona diferenças na temperatura superficial com o teor de umidade devido à complexidade e variabilidade dos fenômenos envolvidos [11, 12, 14].

Nos últimos anos, a indústria da construção está vivenciando uma revolução tecnológica guiada pela digitalização e automação [15]. Vários estudos têm sido conduzidos para integrar os resultados de tecnologias de inspeção em edificações com técnicas de machine learning e com softwares BIM, por meio do desenvolvimento de algoritmos que possibilitam automatizar a identificação de defeitos e da implementação dos resultados das técnicas de inspeção em modelos BIM, facilitando a visualização e identificação de defeitos e reduzindo a subjetividade na análise dos resultados das inspeções.

As técnicas baseadas em machine learning possuem grande potencial para análise e processamento de imagens térmicas [13, 16], contudo, apesar do aumento significativo do seu uso na engenharia civil, existem poucos estudos quanto ao uso dessas técnicas e ferramentas no campo de inspeções de edificações, especialmente em relação à análise de umidade.

Desta forma, este artigo tem como objetivos: (i) apresentar resultados preliminares de ensaios realizados com a TIV para a identificação de critérios indicativos de umidade em alvenarias de tijolos cerâmicos revestidos com argamassa em duas condições distintas de temperatura e umidade relativa ambiente; e (ii) apresentar os recentes avanços com o uso de machine learning para automatizar a identificação de defeitos em edificações e também os estudos sobre a integração dos resultados de técnicas de inspeção em modelos BIM para facilitar o diagnóstico e o monitoramento de defeitos em edificações.

## Definição de critérios indicativos de humidade em alvenarias com a TIV

**Metodologia.** Os experimentos laboratoriais para monitoramento de humidade com a TIV e o método gravimétrico (MG) foram conduzidos conforme as etapas constantes da Figura 1.

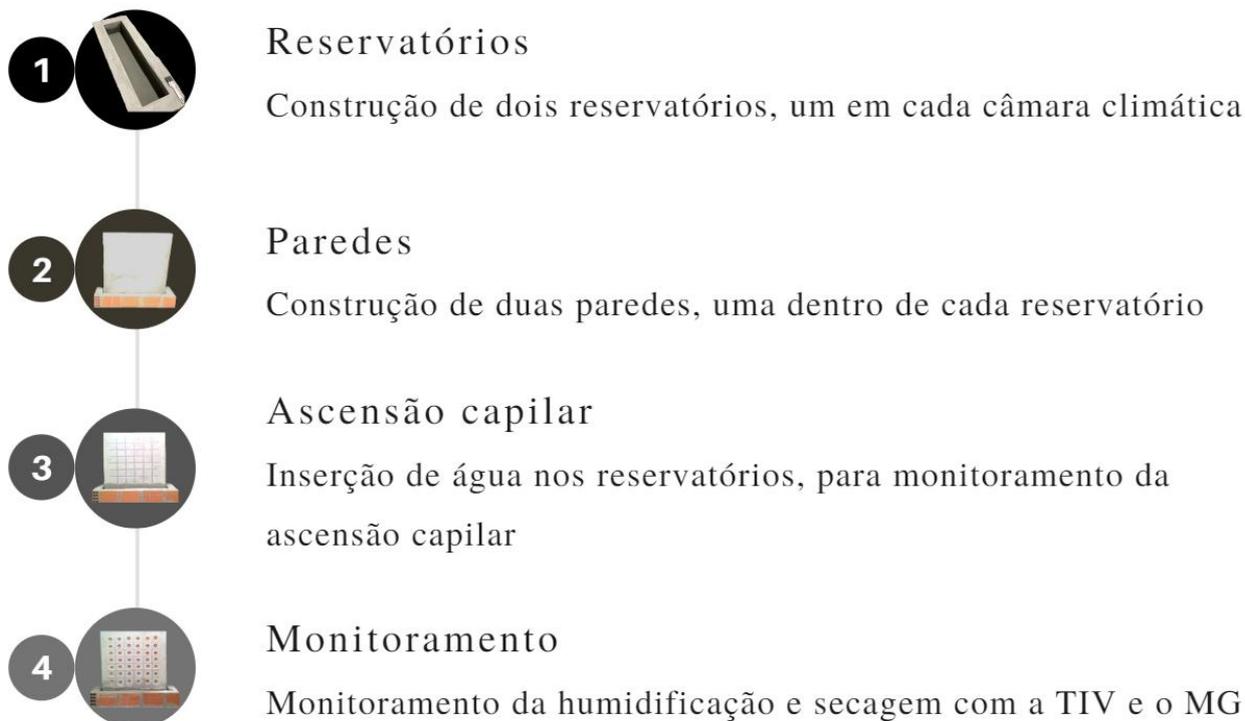


Figura 1: Etapas dos experimentos laboratoriais

Para esta campanha experimental, foram construídos e impermeabilizados dois reservatórios em duas câmaras climáticas diferentes. Em uma das câmaras, denominada de “câmara quente”, a temperatura e a humidade relativa foram ajustadas a aproximadamente 30°C e 60%, respetivamente. A outra câmara climática, denominada de “câmara fria”, foi ajustada com temperatura e humidade relativa de aproximadamente 15°C e 90%, respetivamente. Dentro de cada um dos reservatórios foi construída uma parede de dimensões de 0,93 m de largura por 0,99 m de altura, executada em tijolo cerâmico com dimensões de 9 x 19 x 29 cm<sup>3</sup> e com revestimento feito em argamassa pré-doseada de espessura de 2 cm. As paredes não foram revestidas com argamassa até a cota de 13 cm, com o objetivo de acelerar a percolação da água por ascensão capilar.

Em seguida, foram efetuados os ensaios para determinação da emissividade, segundo a norma ASTM E1933-99a [17], e para determinação da temperatura aparente refletida, conforme a ASTM E1862-97 [18]. Logo após, foram demarcados nas paredes os locais para monitoramento com a TIV e o MG e foi inserida água nos reservatórios para análise da percolação da água por ascensão capilar. Imediatamente após a fase de humedificação, iniciou-se a fase de secagem, nas mesmas condições ambientais. A Tabela 1 contém o período total de monitoramento das fases de humedificação e secagem em cada uma das câmaras climáticas.

Tabela 1: Período total de monitoramento em cada câmara

	Câmara quente		Câmara fria	
	Humidificação	Secagem	Humidificação	Secagem
Tempo de monitoramento	359h	263h	387h	407h

Durante as fases de humedificação e secagem, foram efetuadas 12 e 11 medições, respetivamente, em ambas as paredes. No início de cada fase foram efetuadas medições com menor intervalo de tempo e com o decorrer do ensaio as medições ficaram mais espaçadas. Em cada tempo

de monitoramento, foram tiradas uma imagem térmica e uma imagem digital e, em seguida, foram extraídos provetes de toda uma coluna (vertical), para análise da humidade com o MG.

A câmara de infravermelhos utilizada foi o modelo E40 da marca FLIR Systems, a qual possui resolução de infravermelhos de 160 x 120 pixels. Na Figura 2 apresenta-se o esquema da realização dos ensaios dentro das câmaras climáticas. A metodologia de construção dos provetes, a especificação de equipamentos e materiais e o procedimento de realização dos experimentos laboratoriais constam de maneira mais detalhada em [19].

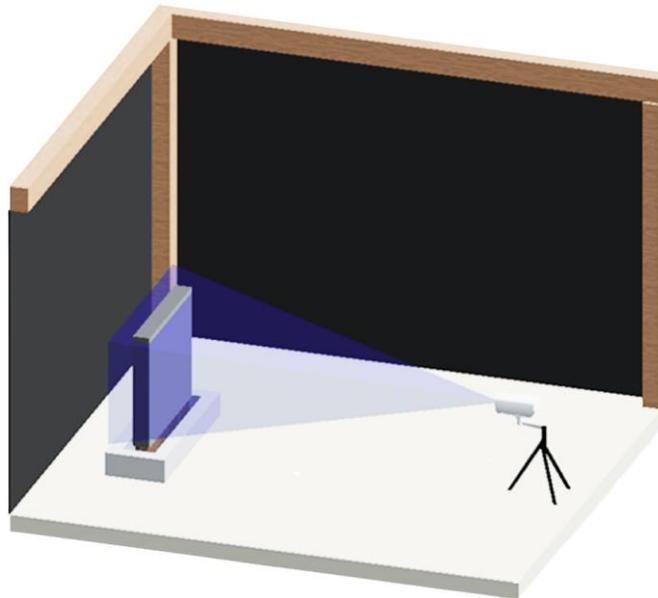


Figura 2: Representação esquemática do *layout* dos experimentos laboratoriais

A análise da correlação entre o gradiente térmico identificado pela TIV entre as regiões húmidas e a região seca ( $\Delta T$ ) e o teor de humidade medido pelo método gravimétrico ( $u$ ) foi feita por meio de uma análise de regressão. Em seguida, efetuou-se a análise da matriz de correlação entre as variáveis contínuas do ensaio, nomeadamente  $\Delta T$ , “ $u$ ” e fase. O objetivo da análise da correlação foi verificar se as variáveis são estatisticamente significativas entre si e qual é o grau da correlação linear entre estas. Posteriormente, fez-se a análise dos gráficos de dispersão dos pontos em cada uma das fases do ensaio (humidificação e secagem), com rótulo de dados de tempo, para analisar os valores de  $\Delta T$  e “ $u$ ” obtidos em cada momento do ensaio.

A análise de clusters de K-médias foi efetuada com o objetivo de agrupar os pontos de acordo com as variáveis  $\Delta T$  e “ $u$ ”, para verificar os  $\Delta T$ s indicativos de pontos com altos teores de humidade em cada um dos cenários de medição. A análise de clusters de K-médias foi precedida da análise de cluster hierárquico, para identificação do arranjo de clusters mais adequado.

### **Análise de resultados**

Primeiramente, realizou-se a análise qualitativa dos resultados obtidos nos ensaios de humidificação e secagem das paredes situadas nas câmaras quente e fria. A Figura 3 contém as imagens digitais e térmicas obtidas na fase de humidificação da parede situada na câmara quente com: (a) 2 horas; (b) 119 horas; e (c) 359 horas de ensaio. Com 2 horas de humidificação já foi possível visualizar um gradiente de temperatura entre a base da parede e a parte superior. Já com 119 horas de ensaio, o gradiente térmico foi superior àquele identificado ao final do ensaio, com 359 horas de medição. Ainda, ressalta-se que foram identificados gradientes térmicos em locais onde a humidade não era visível a olho nu nas fases de humidificação e secagem nas paredes localizadas em ambas as câmaras climáticas. As imagens digitais e térmicas referentes às demais etapas do ensaio constam de [19].

A análise de regressão efetuada para identificação do modelo mais adequado retornou os resultados de  $R^2$  e os parâmetros das equações constantes da Tabela 2 e da Tabela 3, referentes aos ensaios com a parede da câmara quente e da câmara fria, respetivamente. A Figura 4 contém os gráficos com as curvas de cada modelo de regressão. Os dados referentes às três primeiras medições efetuadas na humidificação da parede da câmara fria precisaram ser descartados devido a problemas de medição.

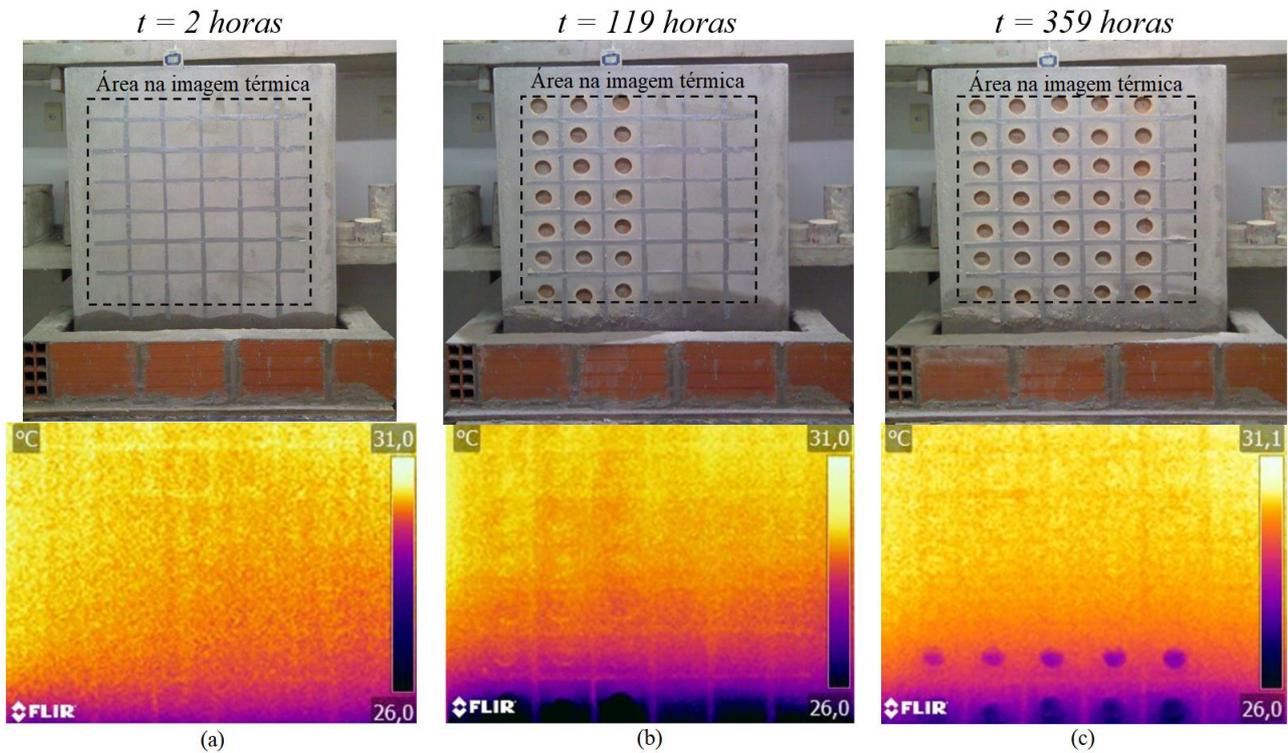


Figura 3: Imagens digitais e térmicas da fase de humidificação da parede na câmara quente. (a) 2 horas de medição; (b) 119 horas de medição; (c) 359 horas de medição

Tabela 2: Valores de  $R^2$  e estimativas de parâmetro para os modelos de regressão – parede câmara quente

Modelo	$R^2$	Estimativas de parâmetro		
		Constante	b1	b2
Linear	0,689	-0,526	0,475	
Logarítmico	0,706	-0,992	1,837	
Quadrático	0,705	-1,522	1,052	-0,069
Potência	0,399	0,069	2,032	

Tabela 3: Valores de  $R^2$  e estimativas de parâmetro para os modelos de regressão – parede câmara fria

Modelo	$R^2$	Estimativas de parâmetro		
		Constante	b1	b2
Linear	0,911	-0,368	0,125	
Logarítmico	0,905	-0,765	0,658	
Quadrático	0,913	-0,494	0,175	-0,004
Potência	0,710	0,001	3,579	

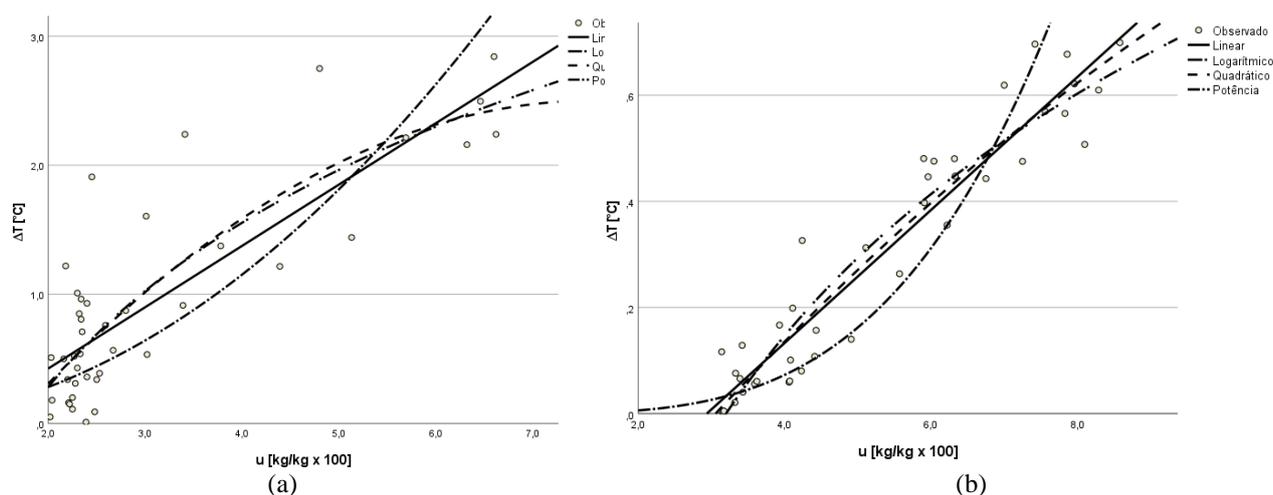


Figura 4: Curvas de regressão. (a) parede câmara quente; (b) parede câmara fria

Os modelos linear, logarítmico e quadrático apresentaram valores elevados de  $R^2$  nos dois ensaios, sendo os resultados ligeiramente superiores para a parede localizada na câmara fria. Este facto pode estar relacionado com um eventual maior impacto da temperatura e humidade relativa do ar nos resultados. Para seleccionar, dos três modelos de regressão, qual o que melhor se ajusta às medições efetuadas, foi calculada a raiz do erro quadrático médio (RMSE) para análise da diferença entre os valores fornecido por cada modelo em relação aos valores observados. A Tabela 4 contém as equações dos modelos que apresentaram os maiores valores de  $R^2$  com menores valores de erro em cada um dos ensaios. Como o gradiente térmico depende das propriedades dos materiais e das condições ambiente (temperatura, humidade relativa, vento, dentre outras), ressalva-se que as equações apresentadas restringem-se às condições específicas desta campanha experimental.

Tabela 4: Equação e parâmetros dos modelos de regressão selecionados

Parede	Modelo de melhor ajuste	Equação	$R^2$	RMSE
Câmara quente	Logarítmico	$\Delta T = 1,837 \ln(u) - 0,992$	0,71	0,45
Câmara fria	Linear	$\Delta T = 0,125u - 0,368$	0,91	0,07

A Tabela 5 e a Tabela 6 contêm as matrizes de correlações dos resultados nas câmaras quente e fria, respetivamente, efetuada com as variáveis contínuas do experimento. São apresentados o coeficiente de correlação de pearson ( $r$ ) e o  $p$ -value. Os valores marcados com “\*\*\*” indicam uma correlação linear estatisticamente significativa entre as duas variáveis, logo, constata-se que o  $\Delta T$  apresentou uma correlação linear estatisticamente significativa e com altos valores com o “u” em todos os ensaios. A fase apresentou correlação estatisticamente significativa com o  $\Delta T$  na parede da câmara quente, entretanto, com um baixo valor, o que indica que os valores de  $\Delta T$  durante a fase humidificação divergiram ligeiramente dos valores de  $\Delta T$  durante a fase de secagem nesta câmara.

Tabela 5: Matriz de correlações das variáveis com coeficiente de pearson ( $r$ ) e  $p$ -value – parede câmara quente

		$\Delta T$	u	Fileira	Coluna	Fase
$\Delta T$	r	1				
	$p$ -value	-				
u	r	0,83**	1			
	$p$ -value	<0,001	-			
Fase	r	0,385**	0,264	-0,589**	0,034	1
	$p$ -value	<0,001	0,091	<0,001	0,564	-

Tabela 6: Matriz de correlações das variáveis com coeficiente de pearson (r) e *p-value* – parede câmara fria

		$\Delta T$	u	Fileira	Coluna	Fase
$\Delta T$	r	1				
	<i>p-value</i>	-				
u	r	0,955**	1			
	<i>p-value</i>	<0,001	-			
Fase	r	-0,08	0,032	0,000	-0,134	1
	<i>p-value</i>	0,196	0,806	1,000	0,010	-

A Figura 5(a) retrata o gráfico de dispersão com os resultados da parede da câmara quente, separados conforme a fase (humidificação e secagem) e com rótulos do tempo de medição, em horas. Com 7 horas de humidificação, os valores de  $\Delta T$  já haviam ultrapassado  $1,0^{\circ}\text{C}$ , mas o valor máximo de  $\Delta T$  ( $2,8^{\circ}\text{C}$ ) foi obtido com 119 horas de ensaio, a partir de quando passou a diminuir, chegando a um valor ligeiramente inferior ao final do ensaio de humidificação ( $2,2^{\circ}\text{C}$ ). Em relação ao ensaio efetuado na parede situada na câmara fria (Figura 5 (b)), como as três primeiras medições foram descartadas, monitorou-se o  $\Delta T$  a partir de 23 horas, momento em que este já apresentava valores superiores a  $0,4^{\circ}\text{C}$ . O  $\Delta T$  máximo nesta câmara foi identificado também com 119 horas de medição ( $0,7^{\circ}\text{C}$ ), seguindo o mesmo padrão identificado na câmara quente e reduzindo ligeiramente até o final do ensaio de humidificação, chegando a  $0,57^{\circ}\text{C}$  ao final.

A análise de clusters foi efetuada com o objetivo de agrupar os dados de  $\Delta T$  e “u” com características semelhantes, conforme consta da Figura 6. Foi definido o agrupamento em três clusters. Em seguida, efetuou-se uma análise descritiva exploratória para identificação dos valores de  $\Delta T$  e “u” de cada cluster. A análise dos *boxplots* gerados possibilitou a identificação de *outliers* e, após a eliminação dos *outliers*, foram encontrados os resultados constantes da Figura 7.

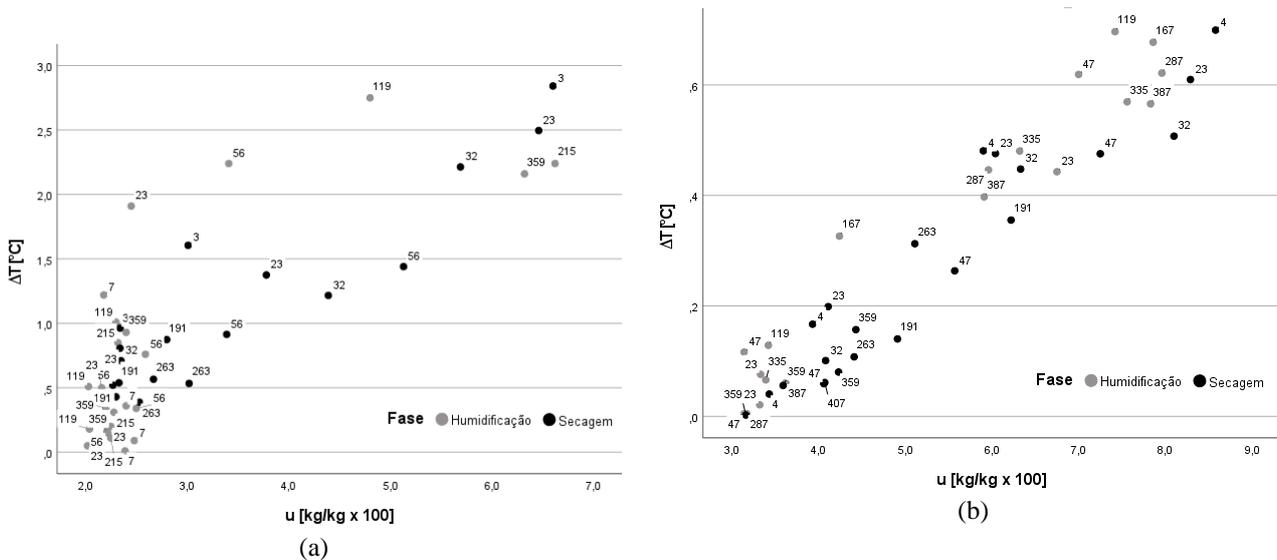


Figura 5: Gráficos de dispersão dos pontos com rótulo de tempo [h]. (a) parede câmara quente; (b) parede câmara fria

A Tabela 7 contém o limite inferior e superior de  $\Delta T$  e “u” para cada um dos clusters, para um intervalo de confiança de 95%. Os valores sombreados em vermelho (cluster 1) indicam os valores de  $\Delta T$  para pontos com teor de humidade elevado, enquanto os valores sombreados em amarelo (cluster 2) indicam os valores de  $\Delta T$  para humidade intermédia e os valores sombreados em verde (cluster 3) indicam valores de  $\Delta T$  para teores de humidade mais baixos. Para a parede na câmara quente,  $\Delta T$ s acima de  $1,06^{\circ}\text{C}$  indicam pontos com humidade intermédia e acima de  $1,95^{\circ}\text{C}$  com humidade elevada, enquanto na câmara fria  $\Delta T$ s acima de  $0,40^{\circ}\text{C}$  já indicam humidade intermédia e acima de  $0,55^{\circ}\text{C}$  indicam humidade elevada, o que mostra a grande influência das condições ambientais no gradiente térmico que indica locais húmidos. Como a humidade relativa na câmara fria era muito elevada (90%), ressalta-se que os provetes extraídos das regiões secas nesta câmara (sem humidade proveniente da água em ascensão capilar) apresentaram teores de humidade superiores àqueles identificados nos provetes das regiões secas na câmara quente.

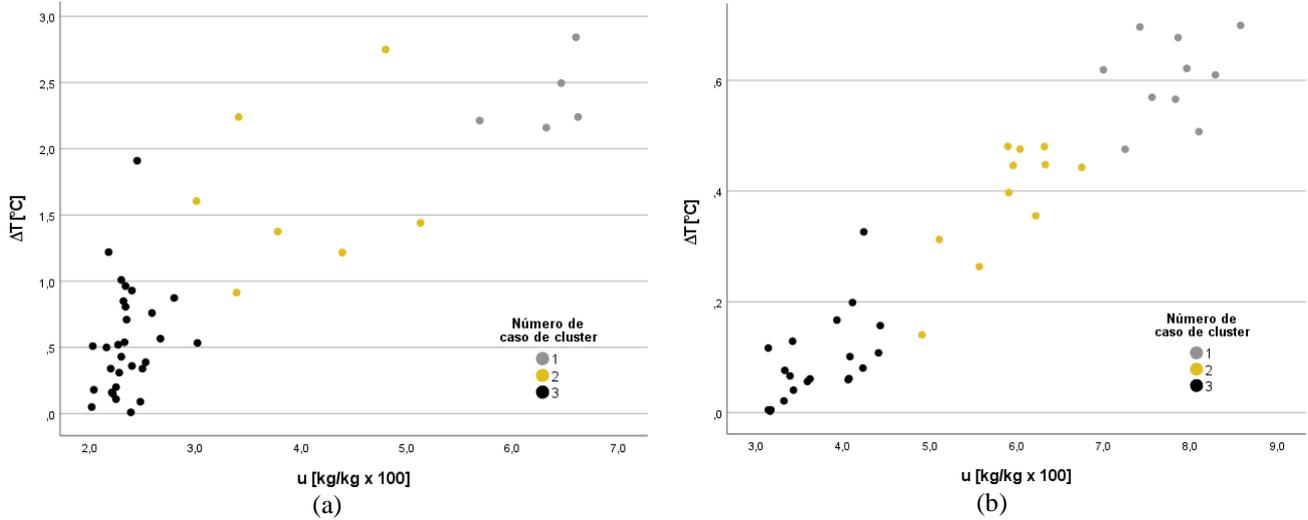
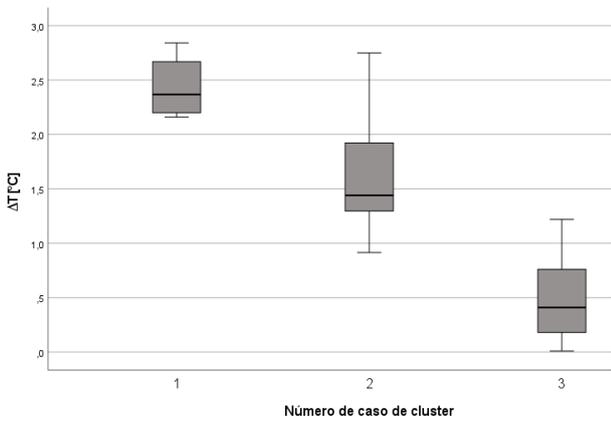


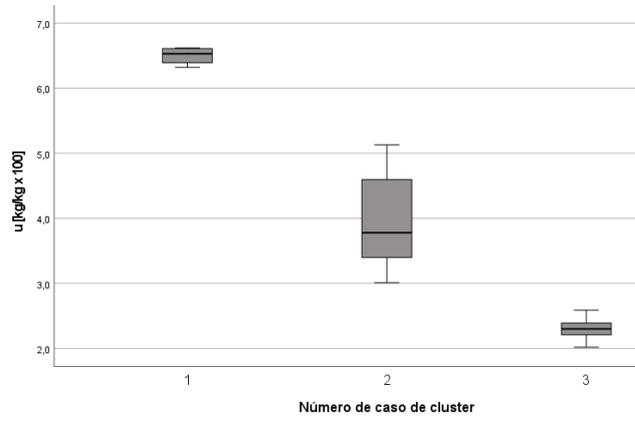
Figura 6: Gráfico de dispersão dos clusters identificados. (a) parede câmara quente; (b) parede câmara fria

Tabela 7: Limite inferior e superior do  $\Delta T$  e “u” de cada cluster

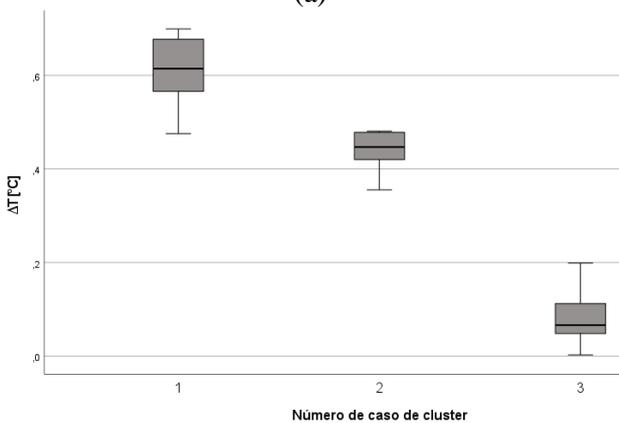
Cluster		Parede câmara quente		Parede câmara fria	
		Limite inferior	Limite superior	Limite inferior	Limite superior
1	$\Delta T$	1,95	2,92	0,55	0,66
	u	6,28	6,72	7,44	8,13
2	$\Delta T$	1,06	1,65	0,40	0,48
	u	3,25	3,99	5,94	6,42
3	$\Delta T$	0,34	0,61	0,05	0,11
	u	2,24	2,35	3,47	3,90



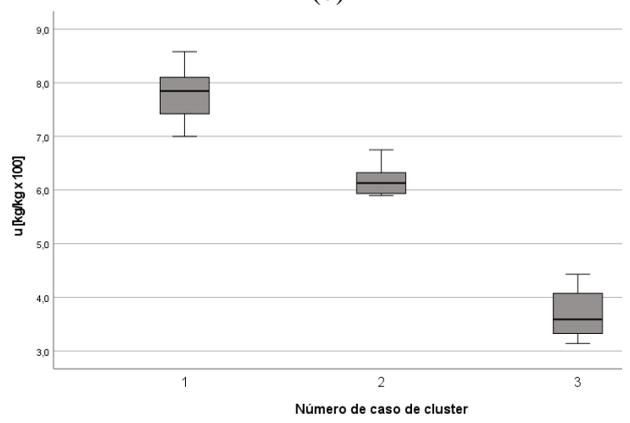
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7: Boxplots dos clusters identificados. (a)  $\Delta T$  dos clusters da parede da câmara quente; (b) “u” dos clusters da parede da câmara quente; (c)  $\Delta T$  dos clusters da parede da câmara fria; (d) “u” dos clusters da parede da câmara fria

## **Automatização da identificação de defeitos e integração em modelos BIM**

Na última década, o aumento do número de bases de dados com imagens, aliado ao avanço das ferramentas computacionais, contribuiu para o rápido desenvolvimento de técnicas de *machine learning* aplicadas à detecção de objetos e/ou determinadas características em imagens, abrindo caminho para a automatização do processo de inspeção visual de edifícios [20, 21]. As técnicas de *machine learning* permitem que o computador realize uma determinada tarefa de forma autônoma e automatizada, após um processo de aprendizagem, que pode ser supervisionado ou não supervisionado [16], o que justifica a grande tendência observada de pesquisas nessa área. Algumas das técnicas de *machine learning* atualmente utilizadas na área de inspeções na engenharia civil são *gradient boosting*, SVM (*support vector machines*), redes neurais, modelos de análise de regressão e também abordagens mais recentes de deep learning [21-23].

Quanto às imagens térmicas obtidas com a TIV, o desenvolvimento de algoritmos de processamento de dados é de fundamental importância para mitigar o ruído das imagens e possibilitar a extração de informações que evidenciem os defeitos existentes [16]. Os algoritmos podem ser baseados tanto em parâmetros térmicos e princípios físicos de transferência de calor (como *Pixel Algorithm for Time-Derivative of Temperature* (PATDT), *Partial Least Square Thermography* (PLST), *Pulse Phase Thermography* (PPT) e *Thermography Signal Reconstruction* (TSR)), quanto em procedimentos matemáticos e analíticos (como *Principal Component Thermography* (PCT) e *Dynamic Thermal Tomography* (DTT)) [16]. Contudo, apesar dos bons resultados obtidos com esses algoritmos, nem todos são automatizados. A possibilidade de se conduzir inspeções de forma *online* e com interpretação automatizada dos dados é de grande interesse, visto que elimina a subjetividade e a dependência da experiência do operador [16, 24].

A Tabela 8 contempla algumas das pesquisas publicadas nos últimos anos com a utilização de algoritmos de processamento de dados e de machine learning para o diagnóstico de edificações e infraestruturas, bem como a informação da técnica utilizada para levantamento dos dados e a patologia ou característica estudada.

Os algoritmos, técnicas de processamento de imagens e técnicas de machine learning aplicados como ferramentas de diagnóstico já foram utilizados na detecção de defeitos como fissuras [20], fragmentações em betão [23], vazios [16, 25], na avaliação da eficiência energética das edificações [13, 26], no estudo de danos relacionados com a cor e geometria dos materiais [27, 28] e também na análise de humidade [22, 29, 30, 31]. Também foram identificados estudos que contemplaram a integração dos resultados provenientes das técnicas de inspeção em modelos BIM [27, 32].

Apesar de terem sido encontrados estudos cujo objetivo era a avaliação automatizada de problemas relacionados com a humidade, grande parte destes aplicam-se a situações específicas, não podendo ser generalizados. Também não foram encontrados estudos que integrem em modelos BIM os algoritmos para automatização da identificação de humidade, para facilitar a inspeção e o monitoramento das edificações.

Tabela 8: Trabalhos recentes com a utilização de *machine learning* e algoritmos de processamento de dados para inspeções na engenharia civil

Artigo	Técnica para levantamento dos dados	Algoritmos de processamento de dados/técnicas de <i>machine learning</i>	Patologia
[22]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Impedância Tomográfica Elétrica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Regressão linear com SVM (LR-SVM)</li> <li>Regressão linear com mínimos quadrados (LR-LS)</li> <li>Rede neural artificial (ANN)</li> </ul>	Humidade
[29]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Método dielétrico, de micro-ondas e gravimétrico</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rede neural artificial (ANN)</li> </ul>	Humidade
[30]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Impedância Tomográfica Elétrica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Variação total (TV)</li> <li>Regressão de menor ângulo (LARS)</li> <li>Rede elástica (EN)</li> <li>Rede neural artificial (ANN)</li> </ul>	Humidade
[20]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Imagens obtidas com <i>drones</i></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rede neural convolucional (CNN) para classificação de imagens com e sem fissuras</li> <li>Rede Neural U-Net para segmentação semântica de pixels de fissuras</li> </ul>	Fissuras
[23]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Imagens RGB</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Algoritmo para retirar ruídos da imagem e evidenciar defeitos</li> <li>Modelo de análise de regressão com técnicas de processamento de imagens</li> </ul>	Fragmentações em betão
[27]	<ul style="list-style-type: none"> <li>GPR, imagens obtidas com drones, escaneamento a laser e TIV</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>OBIA (<i>object-based image analysis</i>)</li> <li>KNN (<i>k-nearest neighbor</i>)</li> </ul>	Pátina, humidade, etc.
[28]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Escaneamento a laser e fotogrametria</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Algoritmo de regressão logística de classificação multi-classe</li> </ul>	Danos quanto à cor e geometria
[25]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fotogrametria (SfM)</li> <li>Imagens obtidas com drone</li> <li>Termografia de Infravermelhos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transformação da matriz de temperatura em uma escala de cinzento</li> <li>Uso de ponderação de intensidade local (LIW)</li> <li>Método do Limite Otsu para dividir a imagem em fundo e primeiro plano (redução de pixels para análise)</li> <li>Método Canny para deteção das bordas das regiões com defeitos</li> </ul>	Defeitos sob a superfície
[13]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Termografia de Infravermelhos</li> <li>Imagens obtidas com drones</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>CED (<i>canny based Edge Detection</i>) e DCI (<i>dominant color isolation</i>)</li> <li>Mask R-CNN para computar os valores de transmitância térmica</li> </ul>	Eficiência energética
[26]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Termografia de Infravermelhos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conversão das imagens térmicas para o formato pgm</li> <li>Algoritmo de deteção de linhas (<i>Line Segment Detector</i>)</li> </ul>	Eficiência energética
[31]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Termografia de Infravermelhos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conversão da imagem térmica em uma escala de cinzento</li> <li>Aplicação de técnica de filtragem bilateral</li> <li>Aplicação do Método do Limite Otsu</li> <li>Técnica de deteção de contornos (filtro termal e geométrico)</li> </ul>	Humidade
[16]	<ul style="list-style-type: none"> <li>Termografia de Infravermelhos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><i>Deep learning</i> - Mask R-CNN</li> </ul>	Vazios sob a superfície

## Conclusão

Os resultados da campanha experimental permitiram concluir que existe uma forte correlação entre o teor de humidade dos provetes e o gradiente térmico entre o provete e a zona seca da parede. Os modelos linear, logarítmico e quadrático garantiram bons ajustes em ambos os ensaios (na câmara quente e na câmara fria), com coeficientes de determinação ( $R^2$ ) superiores a 0,69, contudo, a

equação do modelo de regressão que melhor se ajustou aos resultados obtidos na câmara quente foi completamente distinta da equação que melhor se ajustou aos resultados da câmara fria.

Com a análise de clusters, identificaram-se três grupos distintos em cada um dos ensaios: um com teores de humidade mais elevados, outro com teores intermédios e outro com valores mais baixos. O agrupamento dos pontos apontou que, na câmara quente, pontos com altos teores de humidade apresentaram gradientes térmicos entre 2,0 e 3,0°C, mas que gradientes a partir de 1,0°C já indicaram locais com teores de humidade intermédios (superiores àqueles verificados na região não atingida pela percolação da água por ascensão capilar). Na câmara fria, os gradientes térmicos referentes aos pontos com elevados teores de humidade atingiram valores entre 0,5 e 0,7°C, mas gradientes acima de 0,4°C já indicaram regiões com teores de humidade intermédios. Em face do exposto, verifica-se uma diferença substancial entre os resultados encontrados, indicando a grande influência das condições ambientais nos resultados obtidos com a TIV.

Em face do grande potencial da TIV para inspeção de defeitos relacionados à humidade, mas considerando a grande variabilidade dos resultados obtidos com essa técnica e a subjetividade inerente às inspeções, foram também citadas neste artigo as técnicas que possibilitam o processamento dos dados provenientes das imagens térmicas, permitindo a redução do ruído e o realce das regiões com defeitos. Ainda, foram citados trabalhos publicados na área da engenharia civil para inspeção e monitoramento de defeitos em edificações e infraestrutura com a utilização de técnicas de *machine learning*, como redes neurais (ANN, CNN), regressões (LR-SVM, LR-LS, LARS), redes elásticas e clustering (KNN), além de técnicas de *deep learning*, como Mask R-CNN.

A incorporação de soluções que envolvem inteligência artificial tem sido cada vez mais comum na indústria da construção e o desenvolvimento dessas tecnologias digitais podem auxiliar na obtenção de diagnósticos mais confiáveis e na redução da dependência da experiência do operador. Portanto, pesquisas futuras devem considerar o uso dessas ferramentas aplicadas à análise de humidade e também a integração destas em modelos BIM, para automatizar e facilitar o monitoramento de defeitos em edificações.

## 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).

## Referências

- [1] E. Barreira & R. M. S. F. Almeida, *Infrared Thermography for Building Moisture Inspection*, Springer, Suíça, 2019.
- [2] C. Morón, D. Ferrández, P. Saiz & E. Yedra, *Measuring system of capillary rising damp in cement mortars*, Measurement, 135 (2019) 252–259.
- [3] F. M. A. Henriques, *Humidade em paredes*, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa (1994).
- [4] L. Kempton, G. Kokogiannakis & P. Cooper, *Mould risk evaluations in residential buildings via site audits and longitudinal monitoring*, Building and Environment, 191 (2021) 107584.
- [5] B. Vászrhelyi, *Statistical Analysis of the Influence of Water Content on the Strength of the Miocene Limestone*, Rock Mechanics and Rock Engineering. Austria, 38 (2005) 69-76.
- [6] N. Sathiparan & U. Rumeshkumar, *Effect of moisture condition on mechanical behavior of low strength brick masonry*, Journal of Building Engineering, 17 (2018) 23-31.
- [7] E. Rosina, *When and how reducing moisture content for the conservation of historic building. A problem solving view or monitoring approach?*, Journal of Cultural Heritage, 31 (2018) S82–S88.

- [8] N. P. Avdelidis, A. Moropoulou & P. Theoulakis, *Detection of water deposits and movement in porous materials by infrared imaging*, *Infrared Physics & Technology*, 44 (2003) 189-190.
- [9] A. Hola, *Measuring of the moisture content in brick walls of historical buildings – the overview of methods*, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 251 (2017) 012067.
- [10] T. S. Jing, M. A. Othuman Mydina & N. Utaberta, *Appraisal of moisture problem of inheritance building envelope assemblies via visible and infrared thermography methods*, *Jurnal Teknologi*, 75:5 (2015) 1–6.
- [11] E. Grinzato, N. Ludwig, G. Cadelano, M. Bertucci, M. Gargano & P. Bison, *Infrared thermography for moisture detection: A laboratory study and in-situ test*, *Materials Evaluation*, 69(1) (2011) 97–104.
- [12] E. Rosina & N. Ludwig, *Optimal thermographic procedures for moisture analysis in building materials*, *Em: Proceedings SPIE – Diagnostic Imaging Technologies and Industrial Applications*, 3827 (1999).
- [13] D. Sadhukhana, S. Peri, N. Sagunaraj, A. Biswas, D. F. Selvaraj, K. Koiner, A. Rosener, M. Dunlevy, N. Goveas, D. Flynn & P. Ranganathan, *Estimating surface temperature from thermal imagery of buildings for accurate thermal transmittance (U-value): A machine learning perspective*, *Journal of Building Engineering*, 32 (2020) 101637.
- [14] E. Barreira, R. M. S. F. Almeida & J. M. P. Q. Delgado, *Infrared thermography for assessing moisture related phenomena in building components*, *Construction and Building Materials*, 110 (2016) 251-269.
- [15] M. Q. Huang, J. Ninié & Q. B. Zhang, *BIM, machine learning and computer vision techniques in underground construction: Current status and future perspectives*, *Tunnelling and Underground Space Technology* 108 (2021) 103677.
- [16] I. Garrido, J. Erazo-Aux, S. Lagueta, S. Sfarra, C. Ibarra-Castanedo, E. Pivarciova, G. Gargiulo, X. Maldague & P. Arias, *Introduction of Deep Learning in Thermographic Monitoring of Cultural Heritage and Improvement by Automatic Thermogram Pre-Processing Algorithms*, *Sensors*, 21 (2021).
- [17] ASTM E1933-99a: Standard Test Method for Measuring and Compensating for Emissivity Using Infrared Imaging Radiometers. Estados Unidos, 1999, 3p.
- [18] ASTM E1862-97: Standard Test Method for Measuring and Compensating for Reflected Temperature Using Infrared Imaging Radiometers. Estados Unidos, 1997, 3p.
- [19] L. C. M. Dafico, E. Barreira, R. M. S. F. Almeida & H. Carasek, *Comparison of Infrared Thermography and Other Traditional Techniques to Assess Moisture Content of Wall Specimens*, *Sensors*, 22 (2022).
- [20] K. Chen, G. Reichard, X. Xu & A. Akanmu, *Automated crack segmentation in close-range building façade inspection images using deep learning techniques*, *Journal of Building Engineering*, 43 (2021) 102913.
- [21] A. Sawhney, M. Riley & J. Irizarry, *Construction 4.0 – An Innovation Platform for the Built Environment*, Routledge Taylor & Francis Group, Londres e Nova York (2020).
- [22] T. Rymarczyk, G. Klosowski, A. Hola, J. Sikora & T. Wolowiec, *Comparison of machine learning methods in electrical tomography for detecting moisture in building walls*, *Energies*, 14 (2021) 2777.
- [23] T. Dawood, Z. Zhu & T. Zayed, *Machine vision-based model for spalling detection and quantification in subway networks*, *Automation in Construction*, 81 (2017) 149-160.

- [24] I. G. Garrido, *Automation of the thermographic inspection: Development of thermo-geometric algorithms for detection of pathologies supported by machine learning strategies*, Tese de Doutorado, Universidade Vigo, Vigo (2021).
- [25] M. Puliti, G. Montaggioli & A., Sabato, *Automated subsurface defects' detection using point cloud reconstruction from infrared images*, *Automation in Construction*, 129 (2021) 103829.
- [26] S. Laguela, L. Díaz-Vilariño, J. Martínez & J. Armesto, *Automatic thermographic and RGB texture of as-built BIM for energy rehabilitation purposes*, *Automation in Construction*, 31 (2013) 230-240.
- [27] M. Solla, L. M. S. Gonçalves, G. Golçalves, C. Francisco, I. Puente, P. Providência, F. Gaspar & H. Rodrigues, *A Building Information Modeling Approach to Integrate Geomatic Data for the Documentation and Preservation of Cultural Heritage*, *Remote Sensing*, 12 (2020) 4028.
- [28] E. Valero, A. Forster, F. Bosché, E. Hyslop, L. Wilson & A. Turmel, *Automated defect detection and classification in ashlar masonry walls using machine learning*, *Automation in Construction*, 106 (2019) 102846.
- [29] A. Hola & L. Sadowski, *Non-destructive in situ identification of the moisture content in saline brick walls using artificial neural networks*, Em: *Proceedings of the Creative Construction Conference*, (2019) 012.
- [30] T. Rymarczyk, G. Klosowski, A. Hola, J. Hola, J. Sikora, P. Tchórzewski & L. Skowron, *Historical buildings dampness analysis using electrical tomography and machine learning algorithms*, *Energies*, 14 (2021) 1307.
- [31] I. Garrido, S. Laguela, S. Sfarra, F. J. Madruga & P. Arias, *Automatic detection of moistures in different construction materials from thermographic images*, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 138 (2019) 1649-1668.
- [32] Y. H. Tsai, J. Wang, W. T. Chien, C. Y. Wei, X. Wang & S. H. Hsieh, *A BIM-based approach for predicting corrosion under insulation*, *Automation in Construction*, 107 (2019) 102923.

## Características dos blocos de cimento furados para alvenaria

XIMENES José<sup>1,a\*</sup>, JESUS Carlos de<sup>2,a</sup>, AGUIAR José<sup>2,b</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia Ciências e Tecnologia,  
Universidade Nacional Timor Lorosa'e, Hera, Díli, Timor-Leste

<sup>2</sup>CTAC - Centro de Território, Meio Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Campus de  
Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

<sup>a\*</sup> lebenei@yahoo.com, <sup>a</sup>cjesus@civil.uminho.pt, <sup>b</sup>aguiar@civil.uminho.pt

**Palavras-chave:** Blocos de Cimento Furados, Construção, Alvenaria, Resistência, Mudanças Climáticas, Patologias.

**Resumo.** A utilização do bloco de cimento furado é uma das soluções construtivas em alvenaria e a sua adaptação de acordo com os benefícios económicos, construtivos, não é apenas uma necessidade atual, mas também nacional. A alvenaria é um sistema construtivo amplamente utilizado em todos os países que permite a utilização de paredes como envolvente vertical de edifícios. Os blocos de cimento são produzidos artificialmente, por isso é preciso analisar por meio dos ensaios laboratoriais as propriedades físicas e mecânicas dos materiais utilizados. As mudanças climáticas têm várias consequências em todo o mundo, inclusive nas construções de engenharia civil em geral. Os eventos de verão e inverno estão relacionados a danos à infraestrutura urbana e associados a riscos à sua segurança, tornando-se cada vez mais comuns no futuro. Os ensaios em relação com alvenarias são os ensaios de resistências à compressão, a porosidade, a densidade dos materiais. Há outros ensaios em relação com a durabilidade e a patologia da construção. Os resultados dos ensaios laboratoriais de caracterização e envelhecimento acelerado dos materiais são fundamentais para a obtenção da qualidade e durabilidade dos materiais da alvenaria de blocos de cimento. A resistência dos blocos de cimento está relacionada com a massa do provete. Quanto maior a massa do bloco de cimento, maior será a resistência, quanto menor a massa, menor será a resistência. As superfícies dos rebocos protegida por uma tinta de resina epóxi, resiste melhor ao ataque do sulfato de sódio.

### Introdução

O bloco-de-cimento para alvenaria, está cada vez mais presente em diversas construções, por isso foram incluídas no manual de tecnologias sugerido pela Proteção Ambiental [1].

Os materiais de blocos artificiais que agora vamos estudar justificam a sua utilização, pois numa determinada região não encontramos pedras naturais com as quais pretendemos fazer alvenaria, cantaria, etc. Pode acontecer que as pedras naturais de uma determinada região não temos as propriedades que queremos que a construção tenha. Assim, as pedras artificiais são fabricadas com propriedades análogas às naturais ou que elas não possuem, como isolamento térmico, dureza, leveza, etc. Às vezes, a pedra natural existe, mas devido ao trabalho necessário para extração, transporte, etc. vale mais a pena o uso de blocos de cimento furado.

Para a utilização deste tipo de materiais é imprescindível o conhecimento da sua característica diretamente relacionada com a constituição, bem como a resistência que se requer para a sua aplicação em questão, desta forma poderá evitar alargamentos à superfície e manter a sua funcionalidade para a qual foi projetado, tal fato só é possível com estudos científicos adicionais sobre suas propriedades e desempenho, tornando-o um grande potencial para sua utilização. A resistência desse tipo de bloco de cimento está relacionada à massa do provete. Quanto maior for a massa do bloco de cimento, maior será a resistência, quanto menor for a massa, menor será a resistência [2,3].

A história mostra por sua evidência natural a evolução da tecnologia, cavernas, calçadas, a consequente construção de prédios, palácios, catedrais, pontes e viadutos, muitos dos quais ainda hoje visíveis e com desempenho estrutural considerado satisfatório. Não existiam escolas de engenharia ou processos de disseminação interativa de inovações e novas técnicas construtivas que iam se desenvolvendo, se adaptando e surgindo [2].

Nos países desenvolvidos, recentemente começou a surgir a consciência pública da necessidade de proteger o património arquitetónico e urbano. A combinação do desinteresse da sociedade e do governo com as condições económicas das pessoas que permaneceram nos centros históricos levou a uma situação de profunda degradação de vários edifícios antigos. Neste contexto, o Conselho Internacional de Monumentos e Sítios (ICOMOS) já havia redigido a Carta Internacional de Salvaguarda de Cidades Históricas em outubro de 1987, buscando promover políticas de preservação de centros e bairros históricos, ameaçados pela degradação da divisão e até mesmo destruição devido ao tipo de urbanização que surgiu na era industrial, com o objetivo de fazer frente a perdas irreversíveis de natureza cultural, social e até económica [1].

O fabricante tem como missão oferecer ao mercado soluções simples, rápidas, eficazes e eficientes no uso de artefactos de blocos de cimento. Sua visão é crescer no mercado como exemplo na produção de artefactos de blocos de cimento. Seus objetivos são promover sempre a satisfação da equipe para execução das atividades de forma produtiva, com qualidade, a fim de atender as necessidades dos requisitos e criar um ambiente de parceria com seus clientes, colaboradores e fornecedores, de modo a simplificar processos, reduzir custos e melhorar continuamente a eficácia de seu sistema de produto [4].

## Materiais e metodologia

Em geral os materiais são obedecidos as normas. As normas europeias têm duas partes: uma parte voluntária com a indicação das características e testes e uma parte harmonizada com a diretiva denominada anexo ZA, obrigatória para efeitos de marcação CE, com indicação das características mínimas dos produtos [5].

A norma estabelece regras técnicas para o controlo da produção da fábrica efetuado pelo fabricante, incluindo o ensaio de autocontrolo de amostras, e para as tarefas do organismo de certificação. Estabelece também regras para as ações a seguir em caso de não conformidade, o procedimento para a certificação de conformidade e os requisitos para os centros de distribuição.

Os materiais de alvenaria podem ser classificados de acordo com os diferentes critérios da Tabela 1.

Tabela 1: Classificação de alguns materiais de alvenaria

Critério da classificação	Designação	Descrição	Exemplos
Sobre a aplicação	Materiais de enchimento	Materiais que ocupam o espaço entre os elementos estruturais.	Blocos de cimento
	Materiais de revestimento	Materiais de revestimento de materiais estruturais e enchimentos	Argamassa e tinta

## Provetes e materiais

**Provetes de blocos de cimento furado.** Os blocos artificiais que vamos agora estudar justificam a sua utilização, em consequência de em determinada região, não encontrarmos pedras naturais com que pretendemos fazer alvenarias, cantarias, etc.

Constituem um produto versátil, que possui aplicação na execução de muros divisórios, alvenaria estrutural e de execução de piscinas etc. São inúmeras dimensões de blocos de cimento existente no mercado, no entanto aquelas que mais se fabricam e que se revelam economicamente mais interessante uma vez que são vendidos com maior facilidade são os blocos que possuem as dimensões representadas na Tabela 2.

Os blocos de cimento (Fig. 1a), b), c)) são materiais de grande aceitação na atualidade. Estes são materiais pétreos obtidos artificialmente sendo o processo de endurecimento por reação química. São concorrentes dos tijolos de argila cozida, uma vez que surgiram com a intenção de alcançar uma maior rapidez na construção e durabilidade, um melhor preço e uma superior resistência mecânica.

Tabela 2: Blocos de cimento furados

Tipo	Dimensão (cm)			Peso (kg)		Quantidade/m <sup>2</sup> Peças
	Comprimento	Altura	Largura	B. Normal	B. Leve	
A	50	20	10	10,5	6	10
B	50	20	14,5	14	8	10
C	50	20	20	18	10	10



Figura 1: Blocos de cimento furados

**Provetes de argamassas.** A argamassa é um material artificial formado pela mistura de ligante, areia e água, com ou sem a incorporação de adjuvantes e adições, que desenvolve as suas propriedades por hidratação ou endurecimento ao ar duma pasta de ligante. Trata-se, portanto, de um material constituído por um ligante que aprisiona grãos de areia na sua massa.

A classificação das argamassas depende sobretudo da sua aplicação. Neste momento podemos considerar uma aplicação como a mais importante: argamassas para alvenarias.

As argamassas para o ensaio da resistência foram as dimensões de 160x40x40 mm e outras medidas de 50x50x50 mm para os ensaios de durabilidade.

#### 2.1.2 Materiais para a produção dos provetes

Dentro destes provetes temos os materiais que é o cimento, agregados finos e grossos e a água para a reagir quimicamente o cimento como ligante:

**Ligantes.** Além do cimento Portland (CEM I), NP EN 197-1 [6], existem outros cimentos que podem ser utilizados na construção civil. Os cimentos que foram usados para a produção do bloco de cimento e argamassas baseando o padrão europeu: NP EN 197-1 [6], padrão americano: ASTM C 150-04<sup>a</sup> [7]. É amplamente utilizado em geral para edificações que não possuem requisitos específicos, como casas, prédios altos, pontes, estradas e rodovias. Em geral, o cimento Portland (CEM I) é o mais importante. A NP EN 197-1 de [6] apresenta outros produtos, geralmente resíduos industriais [8].

**Agregados.** Os agregados podem ser designados como finos (tamanho de partícula superior menor ou igual a 4 mm) ou grosso (tamanho de partícula superior maior ou igual a 4 mm e tamanho de partícula inferior maior ou igual a 2 mm). Os agregados também podem ser naturais, artificiais ou reciclados. Os agregados naturais foram submetidos apenas ao processamento mecânico, mantendo a não rugosidade das superfícies. Os materiais artificiais incluem aqueles resultantes da fragmentação propositá-la de blocos, como cascalho, areia de esmagamento ou pó de pedra. Os agregados reciclados resultam do processamento de materiais inorgânicos anteriormente utilizados na construção [9].

**Água.** As funções da água na produção do bloco de cimento furado ou nas misturas das argamassas são para reagir quimicamente com o cimento, hidratando-o, para que endureça por aglomeração dos agregados, e garantir a trabalhabilidade das misturas de produção e argamassas, ou

seja, garantir que a mistura seja facilmente amassada e aplicada, trabalho sem eminência de segregação.

### **Metodologia da caracterização dos blocos de cimento e argamassas**

Todos os ensaios de determinação das características com base na metodologia da norma dos ensaios de blocos de cimento furados e argamassas seguintes;

resistência à compressão de blocos de cimento furados e resistência à flexão de argamassas, O método de ensaio da resistência à flexão e à compressão da argamassa endurecida para alvenaria efetuou-se segundo a EN 1015-11 [10]. Seu objetivo é estabelecer um processo para determinar a absorção do provete de cálculo por imersão em água potável.

análise das partículas de areia e granulométrica. As areias, principalmente as de origem natural, podem conter impurezas em quantidades que não devem ser utilizadas como agregado para argamassas. A NP EN 13139 [11] estabelece os limites aceitáveis para essas impurezas, que podem ser teor de finos ou teor de enxofre total. A classificação das argamassas depende principalmente da sua aplicação. Dentro deste grupo temos as argamassas para revestimento e as argamassas para montagem. A norma EN 998-1 [12] apresenta as especificações das argamassas de revestimento em alvenaria. Por outro lado, a norma EN 998-2 [13] apresenta as especificações das argamassas para montagem [9].

ensaios de absorção de água por capilaridade e imersão para os blocos de cimento furados e argamassas. O ensaio de absorção por imersão do bloco de cimento foi realizado pelo método mencionado na norma NP EN 1097 -6 [14].

Os blocos de cimento são fabricados com argamassa de cimento. Trata-se de um bloco artificial formado pela mistura de ligante, areia e água, com ou sem a incorporação de adjuvantes e adições, que desenvolve as suas propriedades por hidratação ou endurecimento ao ar duma pasta do ligante [9].

Os blocos de cimento furados são produzidos por compactação vibratória e posteriormente curados em câmara húmida. Demora cerca de um mês para obter a resistência total. Devido a problemas de encolhimento, só podem ser utilizados na construção após os 14 dias de idade. São unidades vazias usuais, com dois ou três orifícios de formato cônico para facilitar a retirada da forma após a compactação [15].

Como consequência do caminho percorrido na procura do material ideal, a evolução das técnicas de desenho e execução de obras, problemas e falhas em edifícios e alvenarias começam a aparecer em quase todos os tipos de obras como uma das principais partes integrantes em particular Talvez decorrente da intensificação dessas falhas, o homem passou a analisá-las com maior cuidado, utilizando cada vez mais os princípios da Ciência dos Materiais na construção, principalmente as propriedades dos materiais [16].

Os provetes de argamassa é uma pedra artificial formada pela mistura de ligante, areia e água, com ou sem adição de adjuvantes e aditivos, que desenvolve suas propriedades hidratando ou endurecendo ao ar uma pasta ligante. É, portanto, um material constituído por um ligante que prende os grãos de areia em sua massa.

**Porosidade.** As descontinuidades representam defeitos ou vazios no meio contínuo formado pelos minerais que constituem a matriz rochosa. A presença e o desenvolvimento desses vazios estão intimamente relacionados à deformação e rotura dos blocos. O número de vazios é avaliado pela porosidade ( $n$ ) que é a razão entre o volume de vazios ( $V_v$ ) de uma amostra de bloco de cimento e seu volume total ( $V_t$ ).

$$n = \frac{V_v}{V_t} (X 100) \quad (1)$$

A porosidade é geralmente expressa em percentagem, considerando bloco de cimento 10% como valor médio, 5% como valor baixo e 15% como valor alto.

Densidade

A gravidade específica ou peso específico ( $\gamma$ ) é o peso da unidade de volume da rocha. Levando em consideração a variabilidade da quantidade de água presente no bloco de cimento, a densidade seca ( $\gamma_d$ ) do bloco de cimento é considerada como um parâmetro mais representativo.

$$\gamma = \frac{W_s}{V} \text{ or } \gamma_d = \frac{W_s}{V} \quad (2)$$

$W_s$  - Peso total da amostra de bloco seca no forno

$V$  - Volume total da amostra de bloco

A quantidade de água no bloco pode ser quantificada pelo teor de água ( $w$ ) que é a razão entre o peso da água presente em uma dada amostra e seu peso seco. A densidade do bloco é, portanto, muito variável.

$$W = \frac{W_w}{V_s} (X 100) \quad (3)$$

A classificação da resistência à compressão simples dos blocos também pode ser correlacionada com sua dureza. A dureza do bloco é um conceito diferente que pode ser considerado nos minerais. Geralmente está associada à chamada dureza Schmidt ( $R$ ), que é determinada por meio de testes com o martelo Schmidt. Este valor é então correlacionado com a resistência à compressão simples do bloco que constitui a superfície testada de acordo com o valor de sua densidade.

A constituição e fabricação de blocos de cimento são pedras artificiais formadas pela mistura de ligante, areia e água, com ou sem incorporação de adjuvantes e aditivos, que desenvolvem suas propriedades por hidratação ou endurecimento ao ar [9]. O ideal de armazenamento é manter os blocos em ambiente húmido e sem ventilação pelo maior tempo possível [4].

A construção de alvenaria deve procurar garantir requisitos de comportamento mecânico adequado quando sujeita a ações, bem como garantir as condições de habitabilidade no que diz respeito aos requisitos térmicos e acústicos. Tendo presente a necessidade de minimizar o efeito das pontes térmicas, de garantir massa suficiente para o isolamento acústico e ao mesmo tempo permitir a execução de pormenores construtivos que permitam a correta adaptação do sistema estrutural que se escolhe para um edifício, o inicial sistema construtivo e não apenas a escolha do tipo de bloco que será utilizado na fase de construção. Um sistema construtivo assenta numa família de blocos de diferentes tipos e dimensões que, no seu conjunto, permitem a execução dos vários pormenores necessários a uma boa execução no local e, assim, permitem a concretização de todos os pormenores necessários a uma construção correta.

Relativamente ao processo construtivo, verifica-se que os blocos de duas ou três células permitem a colocação de armaduras verticais embutidas em juntas contínuas de argamassa ou colocadas numa das células verticais e posteriormente preenchidas com argamassa. A solução com blocos de três células permite a utilização de um dispositivo padrão com a célula central sendo perfurada pelos reforços verticais, ou então, a utilização de um dispositivo alterado de forma a criar uma junta vertical contínua para a passagem desses reforços. Em ambas as soluções, a vantagem do sistema com junta vertical reforçada contínua consiste na possibilidade de posicionamento prévio das armaduras verticais, mantendo praticamente a técnica construtiva tradicional de assentamento de alvenarias não estruturais, conduzindo assim a alterações mínimas na tecnologia construtiva.

A reabilitação de patologias não estruturais tem sido tradicionalmente baseada em uma ou mais de seis estratégias, para lembrar: i) - Eliminação de anomalias, ii) - Substituição de elementos e materiais, iii) - Ocultação de anomalias, iv) - Proteção contra agentes agressivos, v) - Eliminação das causas das anomalias, vi) - Reforço das características funcionais.

A adoção de uma destas estratégias ou da sua combinação entre si, depende do tipo de patologia, da facilidade de diagnóstico e das condições técnicas, económicas e sociais de realização das obras de reabilitação. Ao contrário do que seria teoricamente descrito, eliminar as causas das anomalias não é uma das opções mais frequentes, devido aos elevados constrangimentos que a envolvem e que foram elencados acima.

## Trabalho experimental em laboratório

No trabalho experimental de laboratório, a limitação do tempo foi um fator na realização dos ensaios de caracterização e envelhecimento acelerado dos materiais de alvenaria, daí a decisão do plano para a realização dos provetes do ensaio são os seguintes:

Preparação para o ensaio cada provetes são marcados, dimensionados, retificados, cortados e pesados, conforma a especificação da norma com os tipos de ensaio apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Amostras de teste para a realização dos testes

Material	Tipo de Ensaio	Provetes	Dimensões (cm)		
			Comprimento x Larg. x Alt.		
Blocos de Cimento Furados	Absorção de Água por Capilaridade e Resistência à Compressão	Furado, normal	15	15	5,7
		Cortes	10	10	5,7
Argamassas	Resistência à Compressão	A	5	5	5
	Absorção de água e Resistência à Compressão	A	10	10	10
		B	4	4	16

## Determinação das características dos blocos de cimento

**Resistência à compressão de blocos de cimento.** Antes da determinação da resistência à compressão, foi necessário preparar a superfície dos provetes regularizando os blocos de alvenaria, sem orifícios ou com orifícios, para preencher o recalque (Figuras 2a e 2b).

Os blocos de cimento que foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão são 4 provetes conforme Tabela 4. Os quatro blocos de cimento perfurados foram dois de bloco normal e os outros dois de argamassa retificada.



Figura 2: Peças de teste para resistência à compressão de blocos de cimento

Tabela 4: Resultado dos testes de resistência à compressão

Nº dos provetes	Tempo	Força1 (kN)	Área bruta do provete (mm)	Tensão da rotura (N/mm <sup>2</sup> )	Média (N/mm <sup>2</sup> )
Blocos de cimento furado (50 x 10 x 20 cm)					
BFN1	0:5:18.10	257,4	50000	5,1	4,9
BFN2	0:5:13.09	209,9	50000	4,2	
BFR3	0:6:56.63	275,3	50000	5,5	
BFR4	0:6:28.12	243,3	50000	4,9	

Os resultados gráficos do módulo de elasticidade e resistência à tração têm a aparência mostrada na Figura 3.

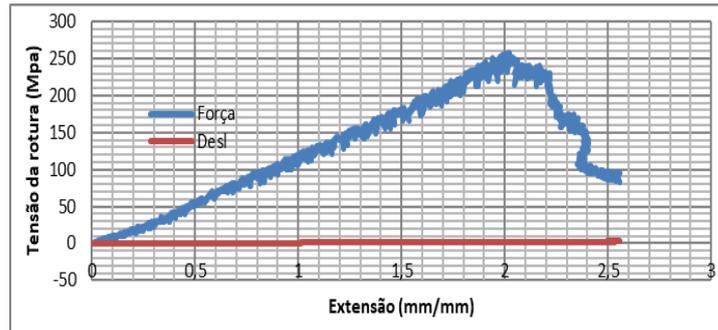


Figura 3: Tensão da rotura do BFN 1

**Resultado da absorção de água por capilaridade.** O produtor deve declarar o coeficiente de absorção de água por capilaridade, quando pertinente ao uso de alvenaria ( $\leq 5 \text{ g} / (\text{m}^2 \text{ s}^{0,5})$ ). A absorção média de água por capilaridade do bloco de cimento não deve ser superior à absorção de água declarada.

O cálculo do coeficiente de absorção de água por capilaridade foi afetado pela seguinte fórmula:

$$c_{wls} = \frac{m_{s0s} - m_{dry,s}}{A_s \sqrt{t_{s0}}} \times 10^6 \text{ (g/(m}^2 \times \text{s}^{0,5})) \quad (4)$$

Onde:  $C_{ws}$  – coeficiente de absorção de água por capilaridade face à vista ( $\text{g}/(\text{m}^2 \times \text{s}^{0,5})$ )

$m_{dry,s}$  – massa do provete checa (g)

$m_{s0s}$  – massa do provete após imersão durante um tempo t (g)

$A_s$  – área bruta da face do provete imersa em água ( $\text{mm}^2$ )

$T_{s0}$  – Tempo de imersão (s)

Os resultados do coeficiente de absorção de água por capilaridade dos blocos de cimento perfurados são apresentados na Tabela 5 e na Figura 4.

Tabela 5: Resultado da absorção de água por capilaridade dos blocos de cimento perfurados (BCP)

Referência	BCP1	BCP2	BCP3	$\bar{O}_{t_{s0}}$	$(m_{s0,s} - m_{dry,s}) / A_s$ Média (1,2,3)	$C_{ws}$
Massa constante (g)	9750,0	9900,0	9750,0			
Tempo de imersão (min) - $t_{s0}$	Peso após o tempo de imersão (g)					
1	9850,0	10000,0	9850,0	7,7	2000,0	89,352
3	9900,0	10050,0	9900,0	13,4	3000,0	
5	9920,0	10070,0	9915,0	17,3	3366,7	
10	9948,5	10087,0	9934,5	24,5	3800,0	
15	9968,7	10102,9	9945,3	30,0	4112,7	
30	9983,6	10117,3	9963,2	42,4	4427,3	-
60	10004,0	10135,0	9978,7	60,0	4784,7	-
180	10031,7	10165,2	10006,3	103,9	5354,7	-
480	10058,0	10191,3	10034,6	169,7	5892,7	-
1440	10123,1	10246,0	10079,0	293,9	6987,3	-
2880	10200,0	10300,0	10150,0	415,7	8333,3	-
4320	10200,0	10300,0	10150,0	509,1	8333,3	-

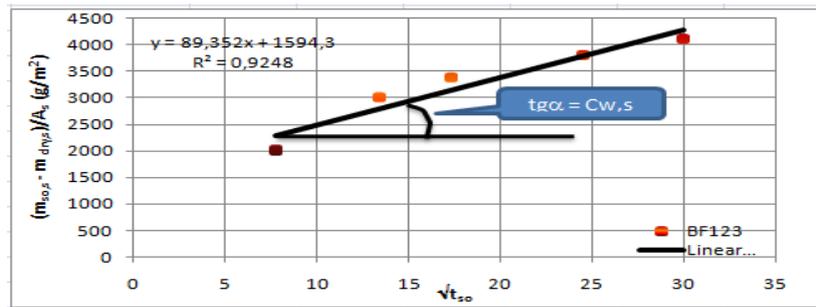


Figura 4: Resultado da absorção de água por capilaridade dos blocos perfurados com determinação do gradiente da parte linear

**Determinação da absorção de água por imersão.** A determinação da absorção de água por imersão foi realizada de acordo com a norma NP EN 1097-6 [14]. Os provetes introduzidos foram blocos de cimento perfurados de 50 x 10 x 20 cm. Os resultados são calculados quantitativa e qualitativamente pela regra da equação (5) na (Tabela 6). O resultado da absorção de água por imersão é (A), calculado como uma percentagem usando a seguinte expressão:

$$A = \frac{m_1 - m_3}{m_1 - m_2} \times 100 \quad (5)$$

Onde: A - Absorção de água por imersão (%)  
 $m_1$  – massa constante (g)  
 $m_2$  – massa imerso (g)  
 $m_3$  – massa seco constante (g)

Tabela 6: Resultados de absorção por imersão dos blocos furados

Nº dos provetes	Tipo dos provetes	Massa seco constante $m_1$ (g)	Massa imerso $m_2$ (g)	Massa seco constante $m_3$ (g)	A (%)	Média (%)
Blocos de cimento furados (50 x 10 x 20 cm)						
1N	Furado	1916,8	1065,7	1777,5	16,4	15,8
2N	Furado	2078,2	1157,4	1926,7	16,5	
3R	Furado retificado	2263	1152,4	2095,5	15,1	
4R	Furado retificado	2032,3	1123,3	1893,4	15,3	

**Determinação das características das argamassas.** A determinação das características das argamassas e sua classificação depende principalmente da sua aplicação. Nesta dissertação podemos considerar a argamassa para alvenaria como a aplicação mais importante.

Eles testaram dois morteiros. Um para assentamento com traço de volume 1: 4 e outro para moagem com traço de peso 1: 3: 0,5.

**Análise de tamanho de partícula de areia.** A análise granulométrica foi realizada de acordo com a norma NP EN 933-1 [17] e os resultados apresentados na Tabela 7 e Figura 5 foram obtidos.

Tabela 7: Resultados da análise granulométrica

Amostra Meia Areia de Rio			
Massa seca total $M_1$ (kg)		1223,10	
Massa seca após lavagem $M_2$ (kg)		1223,10	
Massa seca dos finos removidos por lavagem $M_2$ (kg)		0,000	
Dimensões (mm)	Massa (kg)	% Retido	% Cumulativa passado
63	0,000	0	100
31,5	0,000	0	100
16	0,000	0	100
8	0,000	0	100
4	19,800	2	98
2	280,200	23	75
1	368,600	30	45
0,5	268,000	22	23
0,25	175,000	14	9
0,125	75,900	6	3
0,063	20,200	2	1
P	12,500	-	-
% Finos	-	1,0	-
Total	1220,200	100	-
$\frac{M_2 - (\sum R_i + P)}{M_2} =$			0,2 %

Observações: ensaio válido (< 1%)

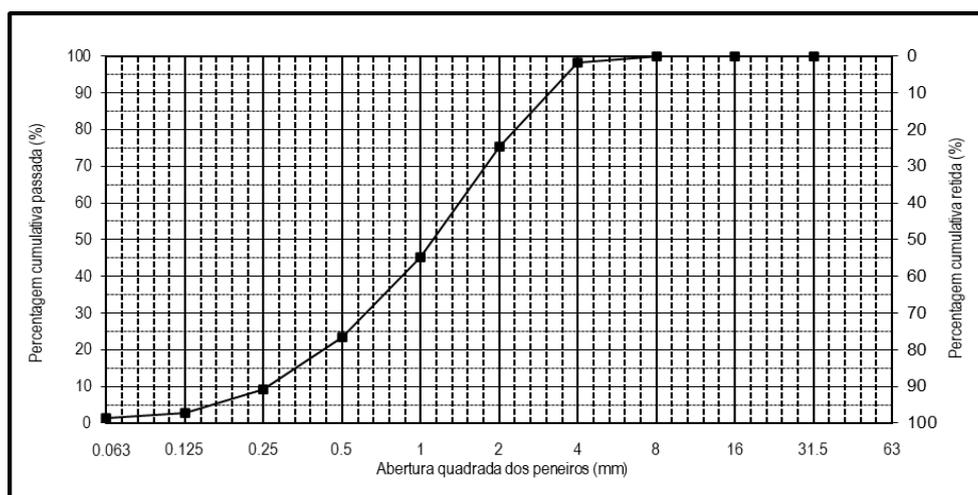


Figura 5: Curva granulométrica

**Determinação da densidade de partículas e absorção de água.** A determinação da densidade das partículas na absorção de água, as propriedades físicas e mecânicas dos agregados, são especificadas de acordo com a norma EN 1097 -6 [14].

Os resultados dos testes sobre as propriedades físicas e mecânicas das argamassas são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8: Resultados dos testes de propriedades físicas e mecânicas dos agregados

Cálculos	Agregados passados no peneiro 3/8" (Método Frasco)	Areia ribeira	Areia artificial
M1	Peso da amostra saturada com a 84 superfície seca (g)	500,00	500,00
M3	Peso do frasco cheio de água (g)	1239,98	1239,98
M2	Peso do frasco cheio com a amostra saturada e água (g)	1542,30	1543,84
M4	Peso da amostra seca (g)	494,10	489,03
$\rho_w$	Peso específico da água à temperatura do Ensaio (g)	1000,00	1000,00
$M4 / M1 + M3 - M2 * \rho_w$	Peso específico das partículas secas (Mg/m <sup>3</sup> )	2499,49	2493,27
$M4 / M4 + M3 - M2 * \rho_w$	Peso específico do material impermeável das partículas (Mg/m <sup>3</sup> )	2576,39	2640,98
$M1 / M1 + M3 - M2 * \rho_w$	Peso específico das partículas saturadas com a superfície seca (Mg/m <sup>3</sup> )	2529,34	2549,20
$100 * M1 - M4 / m4$	Absorção de Água (%)	1,19	2,24

**Determinação da resistência à flexão e compressão da argamassa.** O princípio da resistência à flexão da argamassa é determinado por três pontos de carregamento de um prisma de argamassa endurecida até a ruptura. A resistência à compressão da argamassa é determinada em duas partes resultantes do ensaio de resistência à flexão.

Os corpos de prova devem ser prismas de 160 mm x 40 mm x 40 mm; composto por três amostras testadas para flexão que darão duas metades a cada corpo de prova, somadas darão seis amostras que serão testadas para compressão.

Cálculo e expressão dos resultados, resistência à flexão ( $f_f$ ), em N / mm<sup>2</sup>, utilizando a seguinte equação 6:

$$f_f = 1,5 \frac{Fl}{bd^2} \quad (N/mm^2) \quad (6)$$

Onde: F é a carga máxima aplicada ao corpo de prova em Newton (N).

L é a distância entre os eixos dos rolos de apoio em milímetros (mm).

b é a largura da amostra em milímetros (mm).

d é a profundidade da amostra em milímetros (mm).

O cálculo dos resultados de resistência à compressão  $F / A$  em (N / mm<sup>2</sup>)

Os resultados da resistência à flexão e à compressão das argamassas de mistura em volume (1: 4) são mostrados na Tabela 9.

Tabela 9: Resultados de resistência à flexão e compressão da argamassa

No dos provetes	Resultado da flexão (N)	Tensão (MPa)	Média (MPa)	No dos provetes	Resultado à compressão (N)	Tensão (MPa)	Média (MPa)
1	1103,2	2,6	2,6	a	13900,0	8,7	8,5
				b	14210,0	8,9	
2	1242,8	2,9		a	14580,0	9,1	
				b	14190,0	8,9	
3	1014,0	2,4		a	13910,0	8,7	
				b	11050,0	6,9	
Os provetes de argamassas de 1600x40x40 mm							

**Resistência à compressão de argamassas para retificação.** Use uma argamassa de cimento e areia com resistência à compressão mínima para a retificação da superfície do bloco a ensaiar e na prática real para os rebocos. Quando ensaiados de acordo com EN 1015-11 [10], os provetes têm a resistência esperada para o bloco de cimento furado, fabricado ( $\geq 4-10$  N/mm<sup>2</sup>). O peso é de 450 g de cimento, 1350 g de areia e 225 g de água (1: 3: 2).

Os resultados das resistências à compressão das argamassas são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Resultados das resistências à compressão das argamassas do traço, por peso, para retificação e assentamento

Referência	3 Provetes I	3 Provetes II	3 Provetes III
Idade do provete (dias)	28	28	28
Condições de conservação	Húmido	Húmido	Húmido
Dimensões (mm)	50X50X50	50X50X50	50X50X50
Secção recta (mm <sup>2</sup> )	2500	2500	2500
Massa do provete (g)	0,2677	0,266	0,2654
Tipo de rotura	Normal	Normal	Normal
Carga de rotura (kN)	36,09	40,47	43,99
Tensão de rotura (MPa)	14,44	16,19	17,60
Media (MPa)	16,07		

### Análise dos resultados

Para facilitar a análise dos resultados obtidos, a Tabela 11 mostra a comparação dos materiais ensaiadas da resistência e envelhecimento.

Tabela 11: Comparação de materiais

Materiais	Resistência à compressão (MPa)	Sulfato Sódio por imersão Pi (%)	Nevoeiro Salino M (%)	Sulfato sódio por Capilaridade Pi (%)
Bloco de cimento furado	4,9	78,5	1,1	6,0
Argamassa assentamento	8,5	19,5	5,9	86,3

Estudo das paredes de construção do Estatal em Díli construção dos blocos de cimento.

Ensaio visual e fotos de paredes do edifício de blocos de cimento, patrimônio histórico da Indonésia (State Building).

As patologias encontradas nas alvenarias de blocos de cimento dos edifícios são amostradas nas paredes da construção de estatal de Dili Timor-Leste, na Figura 6a) e b) são ações humanas mal projetadas com análises e modelos de dimensionamento incorretos. Na Figura 6c), mostram as ações químicas naturais devido à presença de umidade e ações das humanas devido às características e consciências e na Figura 6d) por falta de civilidade.

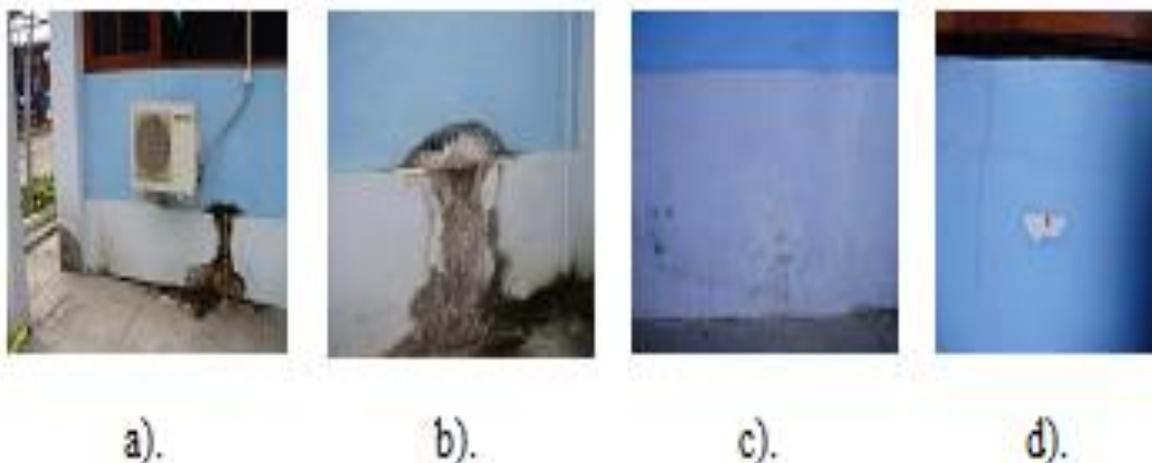


Figura 6: Patologias da superfície da alvenaria de blocos de cimento

### Conclusões

Do passado existe uma história que marca uma evolução na utilização das paredes de alvenaria e atualmente existem motivações económicas para a promoção de uma tecnologia mais racional e assente na simplicidade construtiva, justificando o investimento da comunidade técnica e científica em geral.

A construção de blocos de cimento nos últimos anos tem maior utilização, principalmente nas construções de alvenaria em edifícios modernos. Nos países desenvolvidos da Ásia por exemplo Timor-Leste, Indonésia, 95% - 98% das populações usam este produto.

Na empresa Cimenteira do Louro concluiu-se que a marcação CE está muito implementada e que existe uma grande quantidade de materiais já devidamente certificados.

Os resultados dos ensaios em materiais de alvenaria como blocos de cimento furados e argamassas obtidos mostram que, quando protegida por uma tinta de resina epóxi, resiste melhor ao ataque do sulfato de sódio.

Em grande parte das falhas a água, o clima e o ambiente representa um papel importante: como meio de transporte para colorantes originando manchas, sais ou simplesmente como responsável de danos.

A utilização de materiais de qualidade para alvenaria mais duráveis significa uma vida útil maior e um menor consumo de recursos.

## **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] M. A. Eduardo luso, Paulo B. Lourenço, *Caracterização de edificado, Centro Histórico de Bragança*.
- [2] P. B. Lourenço, F. Pagaimo, and E. Júlio, *Caracterização das paredes de alvenaria da vila de Tentúgal*, Rev. Portugal Eng. Estruturas, vol. 54, (2005) 35–42, 2005.
- [3] J. Gouveia, P. Lourenço, e G. Vasconcelos, *Soluções construtivas em alvenaria*, Congresso Construção 2007, (2007) 1–12.
- [4] Sobrinho, Carlos Wellington de Azevedo Pires, *et al.*, *Blocos de Concreto: Característica do Processo de Produção na Região Metropolitana do Recife*. Rio de Janeiro RJ. Brasil: s.n., 2008.
- [5] Reis Miguel, *A Marcação CE nos Produtos da Construção*, 2009.
- [6] BS-EN197-1: Cement Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements, Br. Stand., no. November, p. 50, 2011.
- [7] C.-04a A. S. ASTM, America Standard for cement.
- [8] NP EN 206-1, A Especificação do Betão. Guia para a utilização da norma, Instituto Português da Qualidade, 19, Lisboa, Portugal, 2008.
- [9] J. L. B. de Aguiar, *Materiais de construção I, sobre Pedras, Ligantes, argamassas, madeiras e Metais*. Universidade do Minho, Guimarães Portugal, 2007.
- [10] EN 1015-11, Determination of flexural and compressive strength, 1999.
- [11] NP EN 13139/AC, Agregados para Argamassas, Instituto Português da Qualidade, Caparica, Lisboa, 2010.
- [12] NP EN 998-1\_2003, Standard, Specification for masonry units- Natural stone masonry, 2000.
- [13] EN 998-2 Standard, Specification for mortar for masonry - Part 2: Masonry mortar, European Committee for Standardization, Caparica, 2001.

- [14] NP EN 1097-6 Standard, Norma Europeia - Tests for mechanical and physical properties of aggregates, CEN - Comité Européu de Normalização, 2000.
- [15] M. F. P. Pereira, *Anomalias Em Paredes De Alvenaria Sem Função Estrutural*, (2005) 489.
- [16] M. G., *Mecanismo de ruptura de alvenaria de blocos à compressão*, 2007.
- [17] NP-EN-933-1, Agregados - Análise granulometria, 2002.

## Uso de drones na construção

MUNIZ Bruno<sup>1,a</sup>, MOREIRA Othon<sup>1,b</sup> e BRAGANÇA Luis<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058  
Guimarães, Portugal

apg45490@alunos.uminho.pt; bothonmoreira@gmail.com; <sup>c</sup>braganca@civil.uminho.pt

**Palavras-chave:** Drones, Inspeção, Patologia, Monitorização de Estaleiro.

**Resumo.** A evolução verificada nas duas últimas décadas impulsionou o desenvolvimento da automação de processos em diversos setores da indústria. Entretanto, o setor da construção é historicamente avaliado como conservador na adoção de novas tecnologias, por um lado contribuindo com a manutenção de práticas tecnologicamente obsoletas, por outro, suscitando um grande potencial de aprimoramento. O emprego dos veículos aéreos não tripulados (vulgo drones) potencia, através da recolha de dados visuais em larga escala e posterior processamento, o aumento da eficiência na construção, em fases de execução, uso e operação. Foi realizado um estudo direcionado à aplicabilidade dos drones para inspeção de edifícios, pontes e outras obras de arte, tendo como foco as limitações de âmbito e tecnológicas. Foram estudados também o funcionamento, a interdependência com outras tecnologias, suas falhas, mais-valias e, por fim, seus potenciais de desenvolvimento. Conclui-se que, apesar da corrente implementação do uso dos drones para a inspeção de fachadas e pontes, ainda há um amplo espaço de aperfeiçoamento, que pode ser evidenciado no uso de processamento de dados visuais através de modelos de deep learning e na integração com modelos BIM [2]. Além disso, existem alguns desafios no que concerne à regulamentação da operação desses veículos. Finalmente, deve-se ter em conta que, devido aos custos e limitações existentes no uso desta tecnologia, a sua utilização deve ser avaliada caso a caso.

### Introdução

A construção tem sido impelida a se modernizar e abandonar seus métodos artesanais, devido as demandas da sociedade por obras cada vez mais rápidas, mais eficazes e com menor impacto ao ambiente. Porém, nem sempre a solução implementada para alcançar estes objetivos é positiva, pois algumas boas práticas têm sido negligenciadas neste processo, gerando efeitos colaterais como obras de má qualidade e reduzida durabilidade. Muitas das patologias identificadas nas edificações têm origem no desrespeito aos prazos entre etapas, a erros de projetos, a baixa qualidade de alguns materiais e a falta de técnica, comprometendo a vida útil e o desempenho da edificação.

A complexidade em algumas vistorias, seja pela questão das alturas envolvidas ou das dificuldades de acesso a certos locais, torna necessária a utilização de equipamentos caros e que pode envolver um elevado risco de segurança para quem os utiliza [1]. Estes fatores acabam por protelar as inspeções preventivas, induzindo a manutenções tardias, o que produz elevação nos custos dos reparos. É importante, portanto, garantir que sejam realizadas inspeções periódicas que permitam identificar as falhas o mais rápido possível, evitando que o problema se amplie e torne seu reparo mais amplo e oneroso. Os drones têm demonstrado ser uma ótima ferramenta para cumprir este objetivo [4].

**A patologia na construção.** O termo patologia engloba toda e qualquer degradação ocorrida no edificado, cuja origem pode ser natural, ambiental ou humana. Elas comprometem a vida útil e as condições de utilização, tendo nas suas principais causas os erros de projeto, falhas de execução, ações mecânicas acidentais ou ambientais, e a falta de manutenção adequada. São diversas as possibilidades de origem dos problemas, mas nem sempre é possível identificar de forma clara e objetiva suas causas, seja pela diversidade de materiais envolvidos, pela variedade de métodos

executivos, pelas propriedades dos seus constituintes, pela agressividade do meio ou mesmo pela interdependência entre eles [7].

É importante, portanto, estudar caso a caso, através de métodos e técnicas reconhecidas, antes de se propor qualquer solução. Deve-se exaurir todas as possibilidades para evitar a recorrência do problema ou mesmo agravamento da situação.

Tabela 1: Alguns fatores que provocam o surgimento de patologias

Fatores Humanos		Fatores Naturais		
Fase do Projeto	Falta de projetos	Físicos	Alterações Climáticas	
	Ausência de ensaios prévios		Ação de ventos	
	Dimensionamento Incorreto		Humidade	
	Seleção de Materiais Inadequados		Tempestades	
	Incompatibilidade entre projetos de especialidades		Sismos	
Fase de Execução	Incorfomidade com o projetado		Químicos	Deslizamento de terra
	Mão de obra sem qualificação			Alterações no solo
	Ausência de controles			Oxidação
	Desrespeito aos prazos mínimos entre tarefas.			Carbonatação
Fase de Uso	Modificações sem projeto			Biológicos
	Degradação de materiais por uso inadequado	Fungos e Bolors		
	Falta de manutenção ou negligenciada	Insetos e Aves		
	Desconhecimento			
Fatores Acidentais	Incêndio			
	Vazamentos			
	Choques mecânicos			

É importante ter ciência, que a esta lista (Tabela 1) não é exaustiva e tampouco tem a intenção de tentar descrever todos os fatores que provocam o surgimento de patologias. A relevância está no fato de perceber que existe uma infinidade de patologias e que o surgimento delas é praticamente inevitável, pois ainda que as causas humanas fossem suprimidas, restariam as de origem natural, por ação dos agentes do meio ambiente [7].

Não se pretende aqui menosprezar as patologias de origem humana, ou simplesmente ignorar sua existência, é importante sim evitar que elas ocorram, pois a qualidade da construção é primordial para sua longevidade e contribui positivamente para que o edificado seja mais resistente à ação da natureza. Mas partindo-se do princípio de que fatalmente, mais cedo ou tarde, haverá patologias em qualquer construção, o que se torna muito importante é inspecionar toda e qualquer edificação, com frequência adequada, pois diversos estudos já comprovaram que o tratamento precoce é importante para evitar o agravamento da situação. A inspeção das construções quando realizada de forma periódica e preventiva pode propiciar uma enorme redução dos custos de reparação - sobretudo no caso de grandes obras de engenharia, como torres, pontes, barragens, edifícios altos (envolvente) e grandes monumentos.

Manter é indiscutivelmente mais barato do que corrigir (lei de Sitter).

**Importância da metodologia.** Existem diversos tipos e técnicas de inspeção que buscam monitorizar as condições de utilização e segurança das construções, de maneira a permitir que sua manutenção e/ou conservação sejam planejadas e executadas rotineiramente, garantindo a sua longevidade [10]. Entretanto, devido a diversidade de materiais e técnicas construtivas, é impossível determinar um modelo padrão que atenda a demanda em geral. A escolha de qual usar depende dos objetivos, da condição de acessibilidade e das características que se pretende pesquisar, sendo importante basear-se em procedimentos normalizados de modo a garantir a qualidade da informação obtida.

Os tipos de metodologia de inspeções a serem feitas dependerão de alguns fatores tais como: tipo de edificação a inspecionar; periodicidade da inspeção; grau de rigor da inspeção; grau de urgência e acessibilidade ao edificado [7].

Na anamnese inicial vai ser buscada toda e qualquer informação relevante que possa antever os obstáculos, os recursos que serão necessários para fazê-lo, o histórico dos problemas e manutenções

já realizados, as técnicas e materiais usados na construção, dentre outras informações que possam ser relevantes e que orientarão o planejamento.

O grau de urgência e o rigor da inspeção tem a ver com a condição e estado geral do edificado, com sua idade, seu grau de exposição e a sua condição de utilização. Inspeções mais rígidas e detalhadas só se justificam se houver algum motivo para tal.

Pode-se classificar as inspeções em [10]:

- a) Inspeções correntes - baseiam-se na inspeção visual e têm como objetivo identificar ocorrências em fase inicial, como forma de manter a manutenção preventiva. Devem ser feitas com frequência, se possível anualmente. Além disso, para que sejam acessíveis e cumpram sua função, precisam ser práticas, disponíveis e viáveis pois do contrário acabam por ser negligenciadas.
- b) Inspeções detalhadas – baseiam-se em ensaios, em geral não destrutivos, com objetivo de buscar detalhes de possíveis patologias identificadas nas inspeções correntes e/ou quando da manifestação de alguma patologia. Para sua execução poderá ser necessário utilizar equipamentos específicos. O ideal é realizar este tipo de inspeção em prazos maiores, como em intervalos de 5 anos, ou quando necessário, pois via de regra demandam maiores investimentos e recursos.
- c) Inspeções estruturais – são baseadas em técnicas e ensaios mais avançados, geralmente só devem ser feitas quando, em alguma inspeção corrente ou detalhada, for encontrado algum indício de problema mais grave, que venha a expor a risco a integridade da edificação. Normalmente são realizadas em casos de acidentes, alteração de uso e/ou quando identificado algum sinal que motive sua realização. Além disso, costumam ser mais onerosas e não existe uma recomendação prévia de prazo para sua execução.

Para se aprofundar na investigação recorre-se a alguns ensaios, sejam eles destrutivos ou não, que produzirão informações relevantes, contribuindo de maneira decisiva no processo de identificação das causas [7,8,9,10].

A inspeção visual, geralmente, é a primeira a ser feita, pois permite recolher informações importantes que irão direcionar todo o trabalho subsequente. Os métodos tradicionais em geral são demorados, caros, tecnicamente difíceis e invariavelmente necessitam de equipamentos especiais para permitir a inspeção de locais de difícil acesso. O desenvolvimento dos drones, permitiu uma revolução nestes processos com custo menor, maior capacidade de detetar falhas (superior ao olho humano), além de permitir mapeamento em larga escala, otimizando os prazos e resultados.

**Planeamento.** Uma boa inspeção precisa ser bem planeada para que possa lograr êxito. Ao planejar a inspeção será possível identificar qual o tipo de equipamento a ser utilizado, quanto tempo será necessário no processo de coleta de dados e seu posterior tratamento, se existe algum dia ou horário mais apropriado para a realização do trabalho de campo e outras questões da logística do processo, conforme sugerido no esquema da Figura 2.

O estudo prévio do edificado já será útil para apurar os primeiros sinais de possíveis problemas e/ou causas. O conhecimento da geometria, materiais empregados, técnicas utilizadas, histórico de reparações e as características do ambiente local já são suficientes para começar a produzir informações relevantes. Nenhuma informação deve ser descartada previamente, pois como já dito antes, a identificação de causas não é processo simples e envolve uma enorme interdependência entre fatores com origens diversas, conforme proposto na Figura 1.

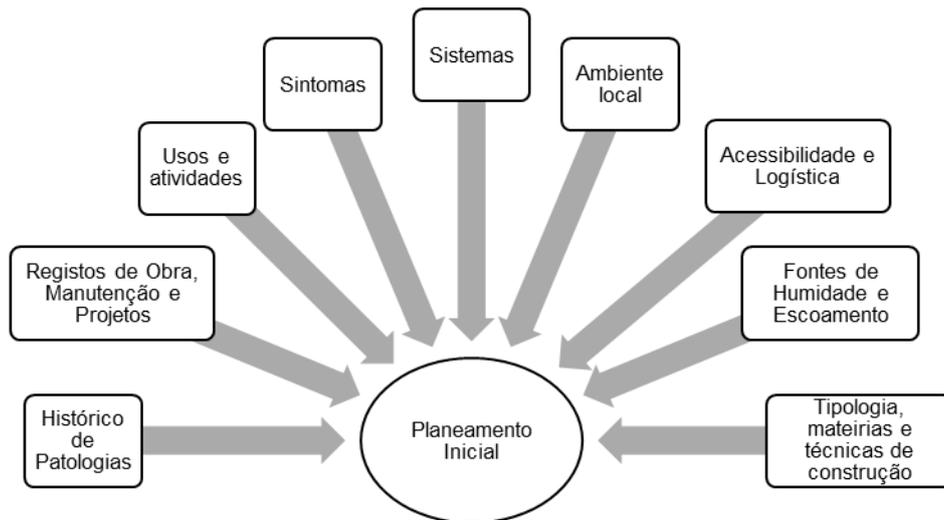


Figura 1: Aspectos importantes a ter em conta na hora do planeamento de uma inspeção

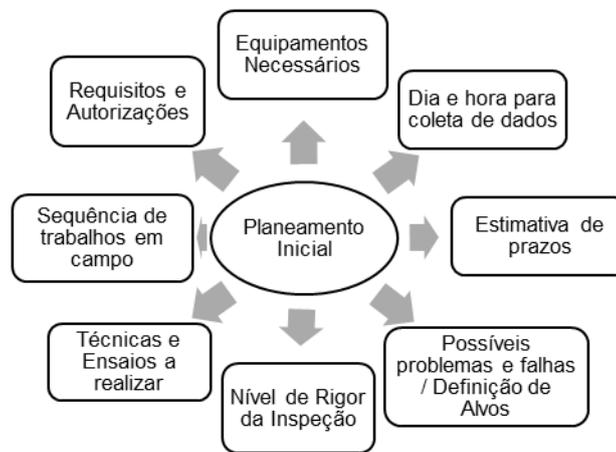


Figura 2: Aspectos a serem definidos no planeamento de uma inspeção

**Componentes do drone.** Para que se aplique os recursos disponíveis nos drones, é preciso conhecer suas tecnologias, vantagens e limitações, de forma a especificar qual modelo é mais indicado e como suprir suas vulnerabilidades. O desenvolvimento destes equipamentos tem introduzido cada vez mais recursos e avanços tecnológicos [5]. Seu funcionamento mecânico tem evoluído no sentido de voos mais estáveis, mais fáceis de operar, menor produção de ruído e interoperabilidade com outras técnicas e sistemas

Os equipamentos de filmagem ou fotografia evoluíram bastante, permitindo obter resoluções maiores e com maior alcance e precisão, o que para a inspeção tem sido bastante útil pois permite obter material com riqueza de detalhes, permitindo visualizar patologias em estágio inicial.

Apenas como referência apresenta-se na Figura 3, um exemplo do equipamento DJI Inspire 2:

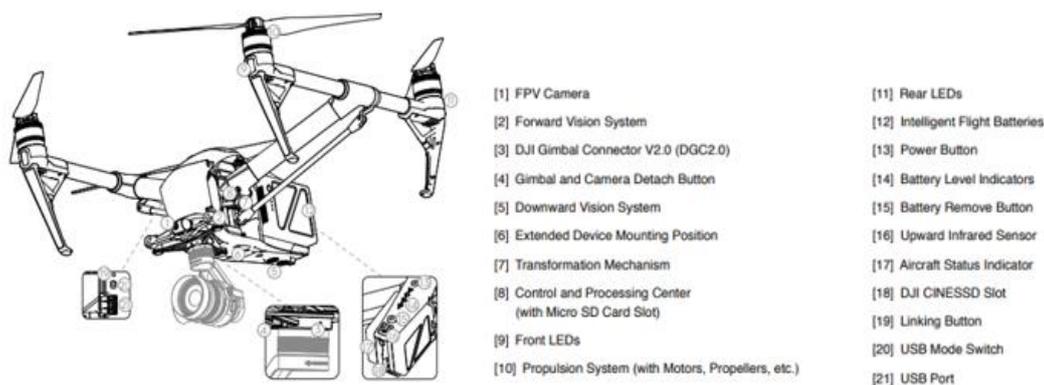


Figura 3: Constituintes do drone DJI Inspire 2

A escolha do equipamento e acessórios a utilizar dependerá dos objetivos a que se pretende atingir. É preciso levar em consideração o tamanho, peso, resolução necessária, clima local e condições de acessibilidade ao equipamento para que seja possível realizar o trabalho em todo o edificado. Os modelos mais indicados para trabalhos de inspeção são os multi-rottores, com dimensões e peso apenas suficiente para garantir uma boa qualidade da câmara. Equipamentos de maior tamanho ou peso devem ser evitados, pois limitam de sobremaneira as condições de acesso a alguns locais, sem contar o fato de que a legislação impõe níveis mais exigentes para sua operação.

O fato do piloto não estar embarcado na aeronave faz com que o controle seja feito através de outros recursos. Existem basicamente três formas de controle de um drone: terrestre (pilotado remotamente), autónomo ou semiautónomo. A norma portuguesa estabelece os modos de pilotagem VLOS (piloto mantém a aeronave sob seu campo de visão) BVLOS (fora do campo de visão, ainda que só por alguns momentos) e EVLOS (quando o campo de visão é estendido com uso de algum recurso adicional).

Em geral, a fonte de energia principal é uma bateria de Li- Po (polímero de lítio), de curta duração. As mais avançadas conseguem apresentar uma autonomia de aproximadamente 45 minutos, sendo que o usual seria em torno de 25 a 30 minutos. Esta limitação induz a um bom planeamento de sua operação, sendo muito comum os utilizadores possuírem baterias reservas para otimizar os trabalhos. É importante salientar que existem tecnologias que poderiam ampliar esta autonomia, porém acarretaria maior peso.

**Legislação.** A base legal existente tem como principais focos a garantia de questões relativas a segurança, a privacidade das pessoas e a manutenção das condições de navegabilidade de outras aeronaves. Nas regulamentações mais evoluídas já se pode perceber critérios mais avançados como a categorização do drone em função do seu peso, a área de voo permitida (com restrições perto de aeroportos, áreas militares, áreas públicas importantes e zonas ou aglomerados densamente populosos), a hora do dia para operação e as altitudes máximas e mínimas permitidas.

No caso de Portugal, a [15], que regula a aviação civil, elaborou as normas aplicáveis, a estas aeronaves, das quais compila-se, na tabela 2 e 3, e esquema da figura 4, os principais pontos:

- O regulamento não se aplica aos UAS - *Unmanned Aircraft System* que se pretende sejam exclusivamente postos a funcionar em espaços interiores;
- UAS com massa operacional superior a 250 gramas, mesmo os de construção caseira, só pode ser operado se o operador estiver devidamente registado;
- O registo do piloto na ANAC é feito em plataforma eletrônica com inserção dos dados pessoais do operador e as informações técnicas do UAS e possui validade de 5 anos, podendo ser revalidado;
- Os operadores de UAS devem contratar um seguro obrigatório de responsabilidade civil para os danos patrimoniais causados por UAS cuja respetiva aeronave tenha uma massa máxima operacional superior a 900 gramas.
- A idade mínima para pilotar uma UAS é 16 anos, com exceções específicas;

- Em todas as situações é preciso autorização para a captação de imagens e vídeos perante a Autoridade Aeronáutica Nacional, mesmo que não tenha intuito de divulgação;
- Devido a lei de proteção de dados é também importante obter autorização dos envolvidos nas imagens.

Tabela 2: Classes de UAS segundo a legislação (ANAC)

Classe	MTOM / Dimensões	Vel. Máx.	Energia	Altura Máxima	Equipamentos e requisitos
C0	Inferior a 250 g	19 m/s	eletricidade	120 m	Pode voar nas categorias A1, A2 e A3 (Open)
C1	Inferior a 900 g ou energia transmitida em caso de impacto inferior a 80 J	19 m/s	eletricidade	120 m	+ N° série único + Identificação Eletrônica Remota + Reconhecimento Geoespacial + Aviso de bateria baixa Pode voar nas categorias A1, A2 e A3 (Open)
C2	Inferior a 4 kg	-	eletricidade	120 m	+ Modo baixa velocidade (máx. 3m/s) Se tiver o modo pode reduzir a distância horizontal para pessoas para 5 m no mínimo. Se não tiver este sistema deve manter-se a no mínimo 30 m. + Luzes indicativas de posição Pode voar nas categorias A2 e A3 (Open)
C3	Inferior a 25 kg e envergadura menor que 3m	-	eletricidade	120 m	+ Ligação de dados protegida a acesso não autorizado Pode voar na categoria aberta A3
C4	Inferior a 25 kg	-	-	-	+ Não deve dispor de meios de controlo automáticos, exceto para assistência à estabilização de voo sem efeitos diretos na trajetória e assistência à ligação perdida, desde que esteja disponível uma posição fixa predeterminada dos comandos de voo em caso de ligação perdida. Na categoria Open, só pode ser usado na A3
C5	Inferior a 25 kg	-	eletricidade	-	+ Não deve ser de asa fixa, exceto se cativa + Modo baixa velocidade (máx. 5m/s) + Monitorar e Aviso no caso de possível perda de comunicação com o controlo + Sistema de pouso emergencial, forçar descida sem deslocamento horizontal Uso na categoria específica
C6	Inferior a 25 kg	50 m/s	-	-	+ Impedir acesso a áreas delimitadas + Permitir a programação da trajetória Uso na categoria específica



Figura 4: Altura regulamentar de voo em função do espaço aéreo

Tabela 3: Categorias de operação segundo a legislação

Requisitos	Categorias		
	Aberta (Open)	Específica	Certificada
Enquadramento	Uso geral	Sempre que não seja cumprida uma ou mais condições de operação da Categoria Aberta	Quando não se enquadrar nas demais
Autorização Operacional	Não é necessária	Exige uma licença de exploração emitida pela autoridade competente ou uma autorização recebida, em casos específicos.	Exige uma certificação do drone e do operador e, sempre que for aplicável, o licenciamento do piloto à distância
Vôo sobre ajuntamento de pessoas	Não podem.	Vôo sobre pessoas não envolvidas ou sobre concentrações de pessoas, independentemente da dimensão característica da aeronave não tripulada;	Possua uma dimensão característica igual ou superior a 3 metros e seja concebido para sobrevoar ajuntamentos de pessoas
Operação	VLOS (ou seja o drone deve estar a todo tempo sob a linha de vista do operador)	Qualquer voo além da linha de vista do operador (BVLOS)	Não aplicável
Vôos sobre áreas restritas	Não podem voar em zonas proibidas ou de restrição operacional de aeroportos ou de heliportos	Qualquer voo nas áreas de restrição operacional	Não aplicável
Limites de Altura e Afastamento de obstáculos	No máximo até 120m acima do terreno, 15m acima de um obstáculo artificial que tenha mais de 105m de altura, desde que não se afaste mais do que 50m do obstáculo	Qualquer voo acima de 120m independentemente da classificação do espaço aéreo;	Não aplicável
Peso Máximo	Até 25 kg	Acima de 25 kg	Não aplicável
Transporte de Carga/ Pessoas	Não permitido	Permite carga não perigosa. Não permite o transporte de pessoas	Permite transporte de cargas perigosas e pessoas.
Operações Especiais	Não permitido	Operações em SWARM (voo sincronizado em espetáculos luminosos)	Permitido
Nível de Requisitos do drone	Quase inexistente, foco apenas na segurança e risco de acidentes.	Exige-se maior nível de controle sobre os equipamentos, com sistemas que permitam a identificação da aeronave e piloto à distância, inclusive permitindo o monitoramento das informações de voo, além da indicação do estado de emergência do UAS	Extremamente exigente. É a única que exige que seja feito um registo prévio do drone passa por inspeções e aprovações semelhantes a de aeronaves comerciais.

**Inspeção visual com drone.** Para se obter um resultado ótimo é preciso seguir uma metodologia de trabalho, que irá conduzir as atividades até a obtenção do relatório final [13]. Após a anamnese, que é fator primordial para o sucesso de todas as etapas posteriores, o primeiro passo a ser dado é escolher o equipamento adequado. É preciso identificar as condições locais, inclusive as climáticas, de modo a definir qual a distância entre o drone e o alvo, as condições da iluminação ou sombreamento e até mesmo implicações de reflexos e ofuscamentos. Estas informações serão vitais não só para a escolha do modelo do drone como também para definir dia, hora e sequência dos trabalhos.

A organização do trabalho irá permitir as pausas necessárias para a substituição da bateria do equipamento e irá por consequência determinar qual a logística será necessária [17]. Como sugestão de organização dos trabalhos apresenta-se a tabela 4.

Tabela 4: Metodologia para inspeção visual com recurso a drone

<b>PREPARAÇÃO - ANTES DO VÔO</b>	<b>EXECUÇÃO -DURANTE O VÔO</b>	<b>INTERPRETAÇÃO - APÓS O VÔO</b>
<p>→Recolher todas as informações do edificado. Idade, tipologia construtiva, geometrias, usos, histórico de manutenções e obras, técnicas usadas na edificação, modelo estrutural etc.</p> <p>→Verificar as condições do local a inspecionar, não só do objeto de estudo como também de toda a vizinhança, altura e obstáculos existentes. Sugere-se pelo menos 20 metros ao redor do alvo. →Identificar condições de acesso e áreas críticas a inspecionar</p> <p>→Montar a logística, inclusive especificando os equipamentos</p> <p>→Determinar a sequência da coleta de dados, baseado nas características do inspecionado e dos equipamentos que serão usados. Importante garantir uma varredura completa e com boa sobreposição de imagens.</p> <p>→Determinar dia e hora mais adequados para o trabalho em campo, baseado nas condições climáticas e nas características das manifestações patológicas</p> <p>→Autorizar o voo, se necessário.</p> <p>→Obter as autorizações dos envolvidos, devido ao uso de dados</p>	<p>→Checar se as condições climáticas estão dentro do esperado (Velocidade e direção do vento; Temperatura, luminosidade e humidade)</p> <p>→Conferir o equipamento e o funcionamento dos acessórios (Baterias e nível de carga; verificar se os sistemas do aparelho se encontram aptos ao voo. (Comando, Câmaras e Sensores</p> <p>→Atestar a segurança da operação, garantir que não haja aglomerações de pessoas ou obstáculos não previstos.</p> <p>→Iniciar a coleta de dados pela sequência pré-determinada</p> <p>→Registrar os pontos de interesse, criando condição de identificar as imagens a posterior</p> <p>→Manter a todo momento atenção nos sinais do equipamento, para evitar algum acidente ou imprevisto, interrompendo a operação ao menor sinal de risco.</p> <p>→Monitorar o andamento dos trabalhos, dentro do programado, para garantir as trocas necessárias da bateria</p> <p>→Garantir a integridade dos dados coletados</p> <p>→Se identificado algum ponto a ser melhor explorado, criar uma nova programação de forma a explorá-lo o quanto necessário.</p> <p>→Após a conclusão da coleta de dados, é feita nova conferência no equipamento, emitindo-se o relatório de campo com as condições em que foram executados os serviços e registando todo e qualquer fato relevante.</p>	<p>→Analisar os registos feitos em campo. A análise das imagens pode ser feita manualmente ou através aplicações informáticas de análise e processamento de dados, que permitem mapear pontos relevantes.</p> <p>→Importante ter convicção antes de emitir um parecer conclusivo. Caso seja necessário, outros ensaios poderão vir a ser feitos para esclarecer eventuais dúvidas.</p> <p>→Cruzar todas as informações de forma a tentar identificar as causas das patologias e localizá-las, através do cruzamento de informações não só das imagens obtidas, mas de toda a pesquisa prévia</p> <p>→Manter os arquivos e registos de todo o processo para garantir o histórico do edificado, de modo a facilitar futuras inspeções e para permitir a devida conferência das consolidações dos reparos eventualmente executados.</p> <p>→Emitir relatório final</p>

**Câmera e processamento.** A utilização dos drones promove velocidade na captura de uma grande quantidade de dados visuais, sejam através de fotos ou vídeos. Porém, parte da sua mais-valia está no fato da utilização da sua possibilidade de integração com câmaras termográficas, no processamento dos dados gerados através de programas de fotogrametria e na interoperabilidade com outros sistemas e equipamentos.

**Termografia.** Existem diversas metodologias voltadas para o emprego de termografia em edifícios para deteção de patologias, que costumeiramente envolvem a captura das imagens com câmaras termográficas por pessoas capacitadas [3].

As câmaras termográficas capturam energia infravermelha emitida pela camada superficial do material, o que é altamente influenciado pela sua emissividade, assim como pelas condições ambientais, orientações do edifício e configurações da câmara. Esses fatores impõem desafios aos inspetores [16].

Alguns testes foram conduzidos em um estudo desenvolvido por [6], para avaliar alguns aspetos que influenciam os resultados da termografia, de forma que configurações incorretas de emissividade da câmara podem gerar dados incoerentes.

Alguns dos fatores que possuem extrema relevância no desenvolvimento da termografia são:

- Diferenças entre temperatura interna e externa do edifício, no que há recomendações que indicam um valor de 10 °C;
- Condições com pouca radiação solar, já que em grande quantidade, a radiação pode saturar demasiadamente os resultados gráficos;
- Para desenvolvimento de modelos tridimensionais através de fotogrametria, é relevante que as fotos capturadas sejam georreferenciadas, ordenadas e calibradas.

**Fotogrametria.** O pós-processamento dos dados visuais obtidos no voo é de extremo valor, já que promove a maior compreensão dos resultados. Desta forma, parâmetros como altitude, qualidade, tempo, espectro e sobreposição devem ser levados em conta no momento do pós-processamento dos dados visuais.

Dentre as técnicas de pós-processamento mais utilizadas, a fotogrametria é uma das que se destaca, pois facilita o processo de monitorização e documentação de edifícios. Com este recurso, é possível obter uma quantidade enorme de pontos 3D de uma estrutura de forma rápida e fiável, que permitem identificar traços visuais das edificações, danos e modificações [11].

As técnicas de fotogrametria podem utilizar georreferenciamento, pontos de controlo no solo, pontos definidos manualmente e uma combinação desses métodos, de forma que o georreferenciamento com registo temporal é o mais fácil de se obter. Visto isso, é necessário que o planeamento do voo leve em consideração esses pormenores, a fim de obter dados com qualidade.

**Especificação técnica do equipamento.** Ao definir o equipamento adequado, deve-se levar em consideração alguns parâmetros que irão influir diretamente na qualidade das imagens obtidas e consequentemente serão capazes de fornecer elementos suficientes para a identificação e análise de eventuais patologias.

- Sensor de imagem: dimensão e resolução, distância focal e resolução necessária;
- Imagem: Tamanho da imagem a ser obtida e a área de mapeamento a ser percorrida;
- Velocidade do Mapeamento: tanto na vertical quanto na horizontal, de acordo com a sequência do plano de voo;
- Taxa de sobreposição: número de imagens ou vídeos e Intervalo entre elas, para garantir que nenhum local fique descoberto;
- Distância ao objeto de estudo, para obter a nitidez e precisão nas imagens;
- Tempo de vôo ou inspeção necessário para varrer toda a área;
- Tempo de processamento das imagens.

**Distância ao Objeto de Estudo (DOE).** Um dos aspetos mais importantes na formulação das especificações para a obtenção de modelos fotogramétricos (nuvem de pontos tridimensional do terreno) através de drones é o Ground Sample Distance (GSD), que é a unidade de área representada por cada pixel da imagem. Quanto menor for o valor de GSD, maior irá ser o detalhe da imagem, o que em inspeções de construções é fundamental, pois se a imagem possuir um elevado nível de detalhe, isto permite que sejam detetadas anomalias de pequena dimensão, como fissuras [18]. Na inspeção de construções, geralmente o objeto de estudo não é o terreno, portanto adotou-se uma nomenclatura mais abrangente, DOE (Distância ao Objeto de Estudo).

Apesar de haver várias formas de cálculo, neste estudo adotamos como base [13]. o princípio da semelhança de triângulos, considerando para o comprimento da imagem (DOEC) ou para a largura (DOEL), a equação (Eq.1), considera como valor a que produzir o mais desfavorável entre os dois, ou seja, o maior valor obtido, conforme figura 5.

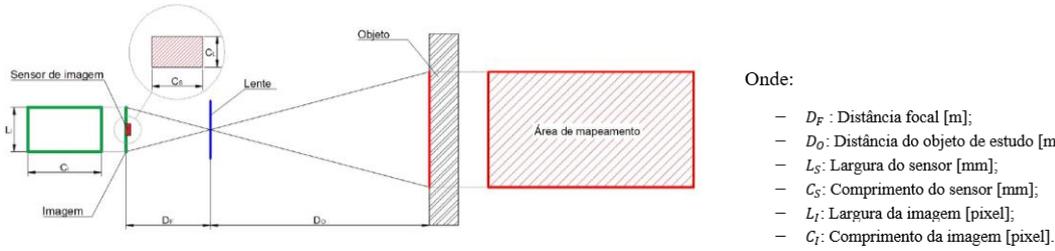


Figura 5: Croqui sensor imagem x área de mapeamento

$$DOE_C = \frac{D_O \times C_S \times 100}{D_F \times C_I} \quad (1)$$

$$DOE_L = \frac{D_O \times L_S \times 100}{D_F \times L_I} \quad (2)$$

**Sensor de imagem.** Componente com a função captar e converter fótons (luz) em elétrons (sinais elétricos) que permitem a captura de imagens e vídeos. Recolher informação sobre o sensor é importante pois esta irá servir para calcular o DOE [13]. A informação que deve ser recolhida sobre o sensor é a sua dimensão física (comprimento e largura) e o crop factor (CF), que é a relação entre a diagonal do sensor e a diagonal equivalente a um full-frame, que nada mais é que a diagonal equivalente a um sensor de 35mm, considerado como o padrão na fotografia. Os fabricantes têm normalmente esta informação declarada na ficha técnica do equipamento.

**Distância Focal.** Outra informação importante para o cálculo do DOE é a distância focal (DF), que nada mais é que a distância entre o centro ótico da lente da câmera e o sensor de imagem, o que é normalmente fornecido pelos fabricantes.

Geralmente a distância focal fornecida, à semelhança do tamanho do sensor de imagem, é a distância focal equivalente a 35mm (DF35), no entanto essa distância não pode ser utilizada no cálculo do DOE, visto que é necessário saber a distância focal real e não a equivalente. Ademais, a distância focal real pode ser calculado através da (Eq.2).

$$DF = \frac{DF35}{CF} \quad (3)$$

**Tamanho da imagem e área de mapeamento.** O tamanho da imagem, tal como o próprio nome indica, é o comprimento da imagem (CI) e a largura da imagem (LI), medidos em megapixéis. Com estas dimensões é possível calcular (Eq. 3) a área mapeada real por cada foto.

$$A = \left( \frac{OSD_C \times C_I}{100} \right) \times \left( \frac{OSD_L \times L_I}{100} \right) \quad (4)$$

**Taxa de sobreposição e velocidade de processamento.** Esta taxa representa, em percentagem, o quanto duas imagens consecutivas se sobrepõem. Quanto maior esta taxa de sobreposição, maior será a precisão do mapeamento efetuado, pois existirão mais pontos em comum entre as duas imagens quando da modelação da nuvem de pontos.

Na inspeção de construções este parâmetro também tem a sua importância no sentido em que se for considerada uma taxa de sobreposição elevada (entre 80% a 90%) garante-se que toda a envolvente da construção é devidamente observada e registada[13].

Tendo definida a taxa de sobreposição, o intervalo de tempo entre registos consecutivos e sabendo o comprimento e a largura real da área mapeada, é possível calcular (Eq. 4) qual a velocidade ótima vertical e horizontal do aparelho para a execução do mapeamento, permitindo definir, portanto, todos os parâmetros para o plano de voo.

$$V_v = \frac{(1 - T_s) \times \left( \frac{OSD_L \times L_I}{100} \right)}{T_F} \quad (5)$$

$$V_v = \frac{(1 - T_s) \times \left( \frac{OSD_C \times C_I}{100} \right)}{T_F} \quad (6)$$

Onde:

- $V_v$  : Velocidade vertical (m/s);
- $V_h$ : Velocidade horizontal (m/s);
- $T_F$ : Intervalo de tempo entre cada foto (s);
- $T_s$ : Taxa de sobreposição (%).

**Comparativo de custos.** Em uma análise comparativa de custo, apresentada na tese de [12], partiu-se da simulação das alternativas de inspeção, convencional e com recurso a drones, executadas no programa computacional Arena Simulation, conforme tabela 5.

Tabela 5: Pontes utilizadas para a simulação das inspeções comum e com recurso a drone

Nº	Ponte inspecionada	Comprimento (m)	Tempo de execução com Drone	Custo da inspeção com Drone	Tempo de execução convencional	Custo da inspeção Convencional
1	US-1- Eau Gallie River	82,30	9	\$5580,00	18	\$16020,00
2	Sykes Creek .8 Mile North of SR520, Prestressed Stringer/Multibeam	91,74	10	\$6200,00	20	\$17800,00
3	Babcock Street over I-95	124,36	10	\$6200,00	22	\$19580,00
4	Principal Arterial - Other Freeways or Expressways (Urban)	147,52	10	\$6200,00	23	\$20470,00
5	0.7 Mile N of SR-528, 0.7 Mile N of SR-528	192,02	12	\$7440,00	28	\$24920,00
6	Crosses Eau Gallie River, Apollo Blvd - Eau Gallie	198,12	16	\$9920,00	26	\$31460,00
7	Crosses St. Johns River	325,53	14	\$8680,00	30	\$36300,00
8	It connects State Road A1A in Indian River County, Florida, to State Road A1A in Brevard County, Florida.	471,83	18	\$11160,00	31	\$37510,00
9	Croccessing Indian River	978,10	25	\$15500,00	34	\$57460,00

Percebe-se que o tempo total de trabalho foi, em todos os casos, superior para a inspeção convencional. A diferença só não foi maior devido ao fato de que na inspeção com drones a etapa de análise e processamento das imagens/vídeos demandou de mais horas de trabalho, em alguns casos pode chegar ao dobro do tempo gasto na coleta de dados.

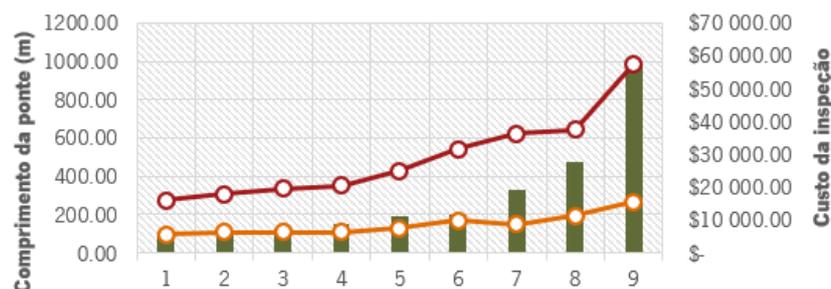


Figura 6: Gráfico comparativo de custo entre a inspeção convencional e com recurso a drone. Fonte[12]

A análise dos resultados, figura 6, permite verificar também que, dentro das premissas adotadas, o valor para inspeção com recurso a drones é inferior em todos os casos. Além disso, quando se considera pontes de maior dimensão, a diferença torna-se ainda maior.

### Conclusões

A utilização dos drones tem contribuído para modernizar alguns processos na construção, em especial como ferramenta de inspeção, permitindo agilizar os processos, executá-los de forma mais precisa, segura e ainda assim ter custos menores. O ritmo da evolução tecnológica destes equipamentos tem sido acelerado, o que tende a torná-lo cada vez mais atrativo, entretanto, a qualidade das fotos e dos vídeos obtidas pode ser fortemente influenciada por diversos parâmetros os quais devem ser controlados para se obter o resultado esperado.

VANTAGENS	LIMITAÇÕES
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Podem voar em locais de difícil acesso</li> <li>• Podem realizar inspeções em locais contaminados e/ou perigosos</li> <li>• Rapidez e flexibilidade</li> <li>• Capacidade de captar imagens em alta resolução</li> <li>• Exige pouca mão de obra</li> <li>• Não são poluentes</li> <li>• Leves e fáceis de transportar</li> <li>• São relativamente simples de manusear.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Devido a seu peso, podem ser perigosos quando em aglomerações de pessoas</li> <li>• Exigem, via de regra, treinamento para sua operação</li> <li>• Baterias de pouca duração</li> <li>• Precisa ser especificado adequadamente para produzir os efeitos desejados</li> <li>• Devem respeitar as condições climáticas</li> <li>• Interferências eletromagnéticas</li> <li>• Obstáculos que dificultem o acesso.</li> </ul>

### Referências

- [1] J. Lanzinha, *Reabilitação de Edifícios - Metodologia de Diagnóstico e Intervenção*, tese de doutoramento, Nova Europa. Universidade da Beira Interior, 2013.
- [2] G. Sousa, *Implementação BIM no contexto de inspeção e gestão da manutenção de Obras de Arte em betão armado: proposta de metodologia e aplicação piloto*, UMinho, Braga, 2017.
- [3] Rakha, T., & Gorodetsky, A., *Review of Unmanned Aerial System (UAS) applications in the built environment: Towards automated building inspection procedures using drones*. *Automation in Construction*, Vol. 93, (2018) 252–264, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.002>.
- [4] A. Banaszek, S. Banaszek, e A. Cellmer, *Possibilities of Use of UAVS for Technical Inspection of Buildings and Constructions*, IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci., (2017) vol. 95.
- [5] *DJI Inspire 2 – Specs, Tutorials & Guides – DJI*, DJI Official. <https://www.dji.com/pt>.
- [6] Barreira, Eva & Freitas, V., *Evaluation of building materials using infrared thermography*. *Construction and Building Materials*, 21, (2007) 218-224.

- [7] D. Leitão e M. Almeida, *Metodologia para a Implementação de Check Lists em Intervenções de Reabilitação*, Guimarães, Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 2004.
- [8] L. V. Paiva, *Guia técnico de reabilitação habitacional* (Volume I), vol. I. INH & LNEC, 2006.
- [9] J. Lanzinha, *Inspeção Técnica de Edifícios Antigos*. Porto: FEUP, Universidade do Porto, 2014.
- [10] J. D. Brito, *Sistemas e Tipos de Inspeção* [Apontamentos da cadeira de inspeção e reabilitação de construções] Universidade de Coimbra, 2001.
- [11] El-Din Fawzy, H., *3D laser scanning and close-range photogrammetry for buildings documentation: A hybrid technique towards a better accuracy*. Alexandria Engineering Journal, 58(4), (2019) 1191–1204, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2019.10.003>.
- [12] Kadamkulangara Balagopalan, R. (2018). *Simulation Based Cost-Benefit Analysis for the Inspection of Highway Bridges using Small Unmanned Aerial Systems*.
- [13] Miraldes, João Pedro N.D., *Inspeção Técnica de Construções com Recurso a Drones – Casos de Estudo*. Universidade Beira Interior, dezembro 2020.
- [14] Tondelo, Patricia Geittenes; Barth, Fernando., *Análise das manifestações patológicas em fachadas por meio de inspeção com VANT*. PARC Pesquisa em Arquitetura e Construção, Campinas, SP, v. 10, (2019) e019009, ISSN 1980-6809.
- [15] ANAC – Autoridade Nacional de Aviação Civil, *Regulamento, regras e procedimentos para operação de aeronaves não tripuladas*, [www.anac.pt](http://www.anac.pt) junho de 2020.
- [16] Andrade, Renan P., *Uso da termografia infravermelha embarcada em drone como ferramenta para a inspeção de patologias em revestimentos aderidos de fachada*. USP, 2020.
- [17] J. Falorca e J. Lanzinha, *Developments towards the use of drones in the building envelope condition assessment - 1a*. Covilhã: Tipografia da Universidade da Beira Interior, 2019.
- [18] A. Oliveira, L. Vieira, e T. Faria, *Prática recomendada de inspeção predial, vistoria cautelar e perícias de engenharia com uso de VANT's*, IBAPE-MG-01-19, Fev. 2019.

## Reforço de paredes antigas de tijolo com varões helicoidais de aço inox

GOMES FERREIRA João<sup>1,a</sup>, MARQUES Ana Isabel<sup>2,b</sup>

GAGO António<sup>1,c</sup>, DEMAJ Armando<sup>3,d</sup>

<sup>1</sup>CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal

<sup>2</sup>Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil 101, 1700-111 Lisboa, Portugal

<sup>3</sup>Epoka University, 1032 Tirana, Albania

<sup>a</sup>joao.gomes.ferreira@tecnico.ulisboa.pt, <sup>b</sup>aimarques@lnec.pt, <sup>c</sup>antonio.gago@tecnico.ulisboa.pt,  
<sup>d</sup>ademaj@epoka.edu.al

**Palavras-chave:** Paredes de Alvenaria Antiga, Paredes de Tijolo Cerâmico Maciço, Reforço, Varões Helicoidais.

**Resumo.** No presente artigo, apresenta-se um estudo experimental relativo ao reforço, de paredes antigas de tijolo cerâmico maciço, com varões de aço inox helicoidais (TSB – Twisted Steel Bars), com dois diferentes diâmetros e dispostos segundo diferentes configurações. Para além dos ensaios iniciais sobre os materiais das paredes e dos elementos de reforço, foram testados à compressão diagonal dois conjuntos de modelos de parede com cerca de 86 cm de lado. Um dos conjuntos foi construído com uma argamassa forte, com um traço volumétrico cimento:areia de 1:5 e o outro com uma argamassa fraca, com traço volumétrico cimento:cal aérea:areia de 1:3:12, correspondendo a diferentes períodos históricos da construção. Os resultados mostram que, no caso das paredes com argamassa forte, o efeito do reforço é praticamente irrelevante enquanto as paredes com argamassa fraca já beneficiam de forma sensível da técnica de reforço implementada.

### Introdução

Uma parte importante dos edifícios antigos, anteriores à geração dos edifícios porticados de betão armado, possui paredes em alvenaria de tijolo cerâmico, maciço ou perfurado, sendo frequentemente maciço nos pisos inferiores e perfurado nos pisos superiores, menos carregados. Na maior parte dos casos, as paredes de alvenaria de tijolo coexistem com paredes de alvenaria ordinária de pedra, encontrando-se estas, de maior espessura, predominantemente nas fachadas e empenas, enquanto as paredes de tijolo são, mais comumente, elementos interiores. Tal como as paredes de alvenaria ordinária de pedra, as paredes de tijolo cumprem funções resistentes face às ações verticais, na medida em que servem de apoio aos pavimentos, sejam eles em estrutura de madeira ou já de betão armado (edifícios “de placa”). Ainda que não tenham sido calculadas, dimensionadas e construídas para resistir a cargas horizontais relevantes, na eventualidade da ocorrência de uma ação sísmica, ambos os tipos de parede vão ser solicitados pelas forças de inércia que se geram, essencialmente na direção horizontal. Se as paredes não possuírem capacidade para resistir a tais solicitações, ocorre, inevitavelmente, o colapso do edifício, parcial ou global.

A estratégia de reforço sísmico de edifícios antigos deverá focar-se, em primeiro lugar, em analisar o seu comportamento face a esse tipo de ação, de modo a identificar os elementos potencialmente mais afetados e os modos de colapso (locais ou globais) que são críticos, i.e., os que ocorrem para um menor valor da ação sísmica. Com base nessa análise, devem preconizar-se técnicas de intervenção que visem, em primeiro lugar, dotar os elementos críticos de maior resistência e ductilidade. Deve-se privilegiar uma intervenção “distribuída”, envolvendo o reforço dos principais elementos do edifício, garantindo um adequado comportamento global face aos sismos, em detrimento de uma intervenção concentrada num número limitado de elementos, que poderá não evitar o colapso, pelo menos parcial, das zonas não intervencionadas. É neste contexto que se insere o estudo realizado, que incide no reforço de paredes antigas de alvenaria de tijolo

cerâmico, pressupondo que faça parte de um conjunto mais alargado de técnicas a implementar nos outros elementos construtivos estruturais, no âmbito de um reforço sísmico global dos edifícios.

## **Objetivos do estudo**

Com o estudo realizado, pretendeu-se analisar o efeito do reforço de paredes antigas de alvenaria de tijolo com a introdução de varões de aço inox helicoidais TSB (Twisted Steel Bars), instalados nas juntas horizontais de argamassa e/ou em rasgos verticais, abertos para esse efeito, em diferentes configurações. A técnica de instalação dos varões é a NSF, do Inglês *Near Surface Mounted*, ou seja, os varões são embebidos em rasgos criados na parede, a uma profundidade reduzida, e selados com uma argamassa própria. O fabricante a que se recorreu fornece varões deste tipo com diâmetros nominais de 6 mm e de 12 mm.

A análise do efeito do reforço foi realizada experimentalmente com base em ensaios de corte por compressão diagonal, tendo sido testados dois conjuntos de modelos de parede.

O primeiro conjunto foi construído com uma argamassa forte, ao traço 1:5 cimento:areia e o segundo com uma argamassa fraca, ao traço 1:3:12 cimento:cal aérea:areia. O primeiro conjunto representa paredes que se podem encontrar em edifícios “de placa”, típicos dos anos 40-60 do século XX, quando a produção e a utilização do cimento portland se generalizou. O traço utilizado para a argamassa forte foi encontrado, por exemplo, na Memória Descritiva do projeto de um edifício da Av. Guerra Junqueiro, Lisboa, datada de 1946.

O segundo conjunto corresponde a paredes mais antigas, em que o ligante habitualmente utilizado nas argamassas era a cal aérea, abrangendo um período temporal mais alargado, em que se incluem os edifícios “gaioleiros”, sobretudo os da sua fase inicial, construídos aproximadamente entre os anos 80 do século XIX, na sequência do plano de expansão da cidade de Lisboa de Ressano Garcia, e os anos 40 do século XX, precedendo os edifícios “de placa”. Neste caso, foi formulada uma argamassa que atingisse as características típicas das argamassas de cal então utilizadas mas num espaço de tempo mais curto, na medida em que o processo de endurecimento da cal aérea, por carbonatação, é muito lento. Por essa razão foi introduzido cimento, ainda que numa quantidade reduzida, que permitiu acelerar o endurecimento da argamassa e realizar os ensaios em tempo útil.

Nos pontos seguintes, apresentam-se os ensaios realizados, os resultados obtidos e as conclusões que foi possível extrair dos mesmos.

Para avaliar a capacidade da solução de reforço numa situação mais exigente, foram primeiro ensaiadas as paredes mais resistentes, com argamassa de cimento e areia, reforçadas com varões de reforço helicoidais de aço inox com diâmetro nominal de 6 mm. Foram selecionados varões com este diâmetro, o menor dos dois disponibilizados pelo fabricante, por serem os mais práticos de instalar devido à sua flexibilidade e facilidade de dobragem. Se o efeito deste reforço nestas paredes tivesse significado, poder-se-ia concluir que mesmo os varões mais económicos e de instalação mais simples poderiam ser utilizados para reforçar as paredes mais resistentes. Numa segunda fase, foram testadas as paredes com argamassa fraca com reforço realizado com os varões de maior diâmetro, 12 mm, para avaliar se, numa situação supostamente menos exigente, pelo menos os varões de reforço mais robustos poderiam conferir um melhor comportamento sísmico.

## **Paredes com argamassa forte – materiais**

A argamassa utilizada para assentamento apresenta, como referido, um traço de 1:5 cimento:areia, sendo o cimento do tipo CEM II da classe 32,5 e a areia composta em 1/3 por areia de areeiro e em 2/3 por areia de rio. De acordo com os ensaios realizados sobre provetes de argamassa, seguindo a norma EN1015-11 [1], os valores aos 180 dias eram de: peso volúmico: 1905 kg/m<sup>3</sup>; resistência à flexão 3,6 MPa; resistência à compressão: 13,7 MPa. Foi ainda obtido o valor de 14,49 GPa para o módulo de elasticidade dinâmico determinado por frequência de ressonância.

Os tijolos utilizados na construção das paredes, que foram obtidos da demolição de um edifício antigo, apresentam dimensões de 23,0 x 11,0 x 7,0 cm. Estes elementos foram testados no LNEC apresentando um valor médio da resistência à compressão de cerca de 30 MPa.

De acordo com os ensaios realizados, os varões helicoidais de aço inox de 6 mm de diâmetro, utilizados no reforço das paredes, apresentam resistência à tração de 11,3 kN. Não se apresentam os resultados em valor de tensão dado que a forma da seção transversal é complexa e a sua área difícil de determinar de forma rigorosa, conforme mostra a Figura 1.



Figura 1: Varões helicoidais de aço inox

Além dos modelos para ensaio por compressão diagonal, foram ainda fabricados 3 modelos de parede com dimensões de 76 x 76 x 25 cm, para ensaio à compressão simples. Os ensaios à compressão simples têm por finalidade determinar um parâmetro – a resistência à compressão – que é significativo em relação à qualidade estrutural global de uma parede deste tipo. O valor médio da resistência à compressão simples das paredes, obtido nos respectivos ensaios, foi de 12,2 MPa, com variações reduzidas entre os diferentes modelos (valores individuais de 11,8; 11,9 e 12,8 MPa).

### **Paredes com argamassa forte – modelos para ensaio ao corte por compressão diagonal**

Foram construídos 11 modelos para ensaio ao corte por compressão diagonal com dimensões de 86 x 86 x 25 cm, sendo 3 deles simples e os restantes reforçados com varões TSB  $\Phi 6$ , com diferentes configurações.

Os modelos de parede foram construídos em aparelho flamengo (a uma vez), conforme a Figura 2 documenta. Os pedreiros envolvidos na construção dos modelos apresentam larga experiência no âmbito da reabilitação das construções e, em particular, na (re)construção deste tipo de elementos.

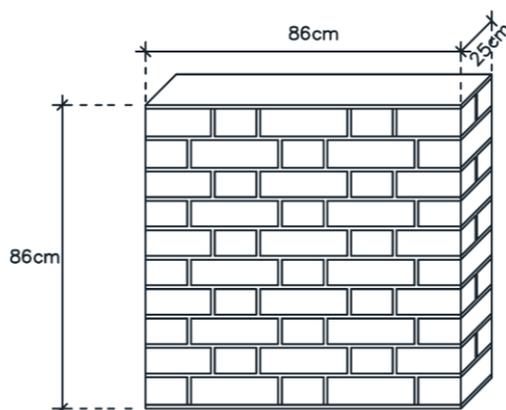


Figura 2: Dimensões dos modelos de parede para ensaio à compressão diagonal [2]

Na Figura 3, apresenta-se a configuração de reforço das paredes, assinalando-se com linhas vermelhas a posição dos varões de reforço, que podem existir numa ou em ambas as faces da parede. Em cada rasgo foi colocado um ou dois varões. Na Tabela 1 apresentam-se os dados dessas configurações.

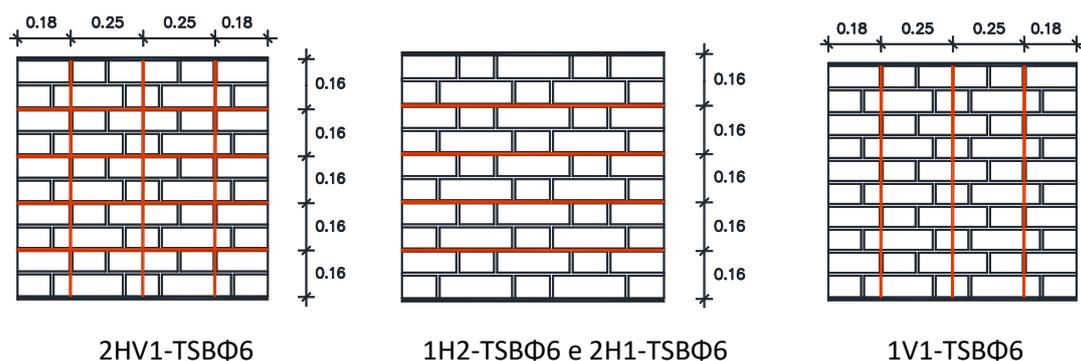


Figura 3: Configurações de reforço das paredes com argamassa forte ensaiadas à compressão diagonal [2]

Tabela 1: Dados das configurações de reforço das paredes com argamassa forte ensaiadas à compressão diagonal [2]

Modelo	N.º modelos ensaiados	Tipo de reforço	N.º de faces com reforço	Configuração de reforço	N.º de varões por rasgo
UR	3	Não reforçados	-	-	-
2HV1-TSBΦ6	2	TSB-Φ6	2	Horizontal e vertical	1
2H1-TSBΦ6	2	TSB-Φ6	2	Horizontal	1
1H2-TSBΦ6	2	TSB-Φ6	1	Horizontal	2
1V1-TSBΦ6	2	TSB-Φ6	1	Vertical	1

### Paredes com argamassa fraca – materiais

A argamassa para assentamento utilizada, neste caso, apresenta, como referido, um traço volumétrico de 1:3:12 cimento:cal aérea:areia. De acordo com os ensaios realizados sobre provetes de argamassa, seguindo a norma EN1015-11 [1], os valores aos 180 dias eram de: peso volúmico: 1777 kg/m<sup>3</sup>; resistência à flexão: 0,13 MPa; resistência à compressão: 0,81 MPa. Foi ainda determinado o módulo de elasticidade dinâmico por frequência de ressonância, de que resultou o valor de 3,24 GPa.

Neste caso, por falta de stock de tijolos antigos, os tijolos utilizados na construção das paredes são de fabrico recente, tendo-se procurado que fossem tão semelhantes quanto possível aos utilizados no fabrico das paredes com argamassa forte. Os tijolos selecionados apresentam dimensões de 25,5 x 12,0 x 6,5 cm e, de acordo com os ensaios realizados, oferecem uma resistência à compressão de cerca de 27 MPa.

De acordo com os ensaios realizados, os varões helicoidais de aço inox de 12 mm de diâmetro, utilizados no reforço das paredes, apresentam resistência à tração de 31,9 kN.

Também neste caso, foram ensaiados à compressão simples 3 modelos de parede, tendo-se obtido um valor médio de 6,4 MPa, com variações reduzidas entre os diferentes modelos (valores individuais de 6,3; 6,4 e 6,5 MPa).

### Paredes com argamassa fraca – modelos para ensaio ao corte por compressão diagonal

Neste caso, foram construídos 12 modelos para ensaio ao corte por compressão diagonal, sendo 3 deles não reforçados e os restantes reforçados com varões TSB Φ12 em diferentes configurações.

Na Figura 4, apresenta-se a configuração de reforço das paredes, assinalando-se com linhas vermelhas a posição dos varões de reforço, que existem sempre em ambas as faces da parede. Em cada rasgo, neste caso, existe apenas um varão. Na Tabela 2 apresentam-se as especificações dessas configurações.

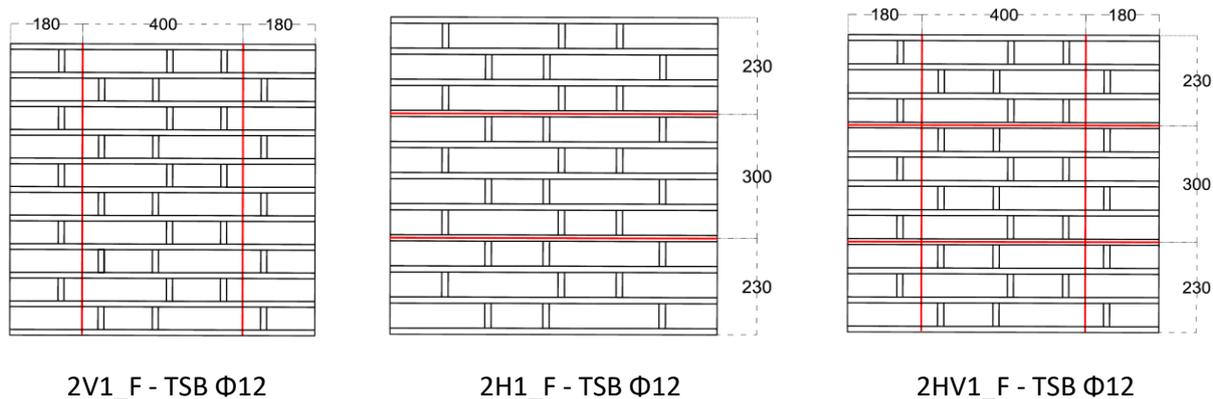


Figura 4: Configurações de reforço das paredes com argamassa fraca ensaiadas à compressão diagonal [3]

Tabela 2: Dados das configurações de reforço das paredes com argamassa fraca ensaiadas em compressão diagonal [3]

Modelo	N.º de modelos ensaiados	Tipo de reforço	N.º de faces com reforço	Configuração de reforço
URF	3	Não reforçado	-	-
2HV1_F	3	TSB-Φ12	2	Horizontal and vertical
2V1_F	3	TSB-Φ12	2	Vertical only
2H1_F	3	TSB-Φ12	2	Horizontal only

### Montagem e procedimento de ensaio

Os ensaios de corte por compressão diagonal foram realizados seguindo a norma ASTM 519/519M-10 [4], numa prensa de 5000 kN do LNEC. Na posição de ensaio (Figura 5) os modelos estão rodados de 45° em relação à posição normal das paredes. Para realizar os ensaios, são colocadas as peças de apoio e de transmissão da carga nos cantos superior e inferior dos modelos de parede (peças metálicas amarelas visíveis na Figura 5) e instalados os deflectómetros eléctricos com os quais são medidas as respectivas deformações. Neste caso, são instalados, em cada face, um deflectómetro vertical e outro horizontal, conforme se pode também observar na Figura 5. Além destes, foram ainda instalados dois outros deflectómetros na cabeça superior móvel da prensa de ensaio. Estes dois deflectómetros permanecem montados, mesmo nas fases mais adiantadas do ensaio, ao contrário dos deflectómetros montados no provete, que têm de ser retirados antes do colapso do modelo para evitar que se danifiquem. Os ensaios prosseguiram até que a carga aplicada descesse para valores inferiores a cerca de 20% da força máxima atingida.



Figura 5: Modelo não reforçado montado na prensa para ensaio de compressão diagonal

## Resultados obtidos nas paredes com argamassa forte

O colapso das paredes com argamassa forte nos ensaios de compressão diagonal está associado, em todos os casos, ao aparecimento e desenvolvimento de fendilhação segundo a diagonal comprimida, i.e., segundo o alinhamento vertical do provete na posição de ensaio, como mostra a Figura 6, a título de exemplo, para alguns dos elementos ensaiados.

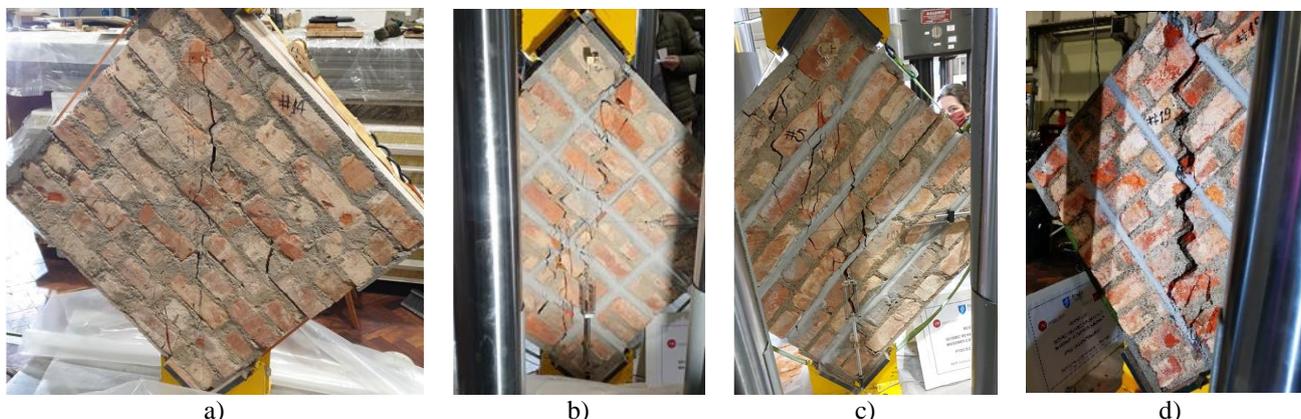


Figura 6: Modo de colapso de paredes com argamassa forte: a) sem reforço (UR), b) com reforço vertical e horizontal (2HV1), c) com reforço horizontal (1H2, 2H1) e d) com reforço vertical (1V1)

Na Figura 7 apresentam-se os diagramas força-deslocamento obtidos nestes ensaios. Os deslocamentos positivos correspondem à média dos deflectómetros verticais enquanto os negativos correspondem à média dos valores obtidos pelos deflectómetros horizontais, incluindo, portanto, o valor da abertura das fendas.

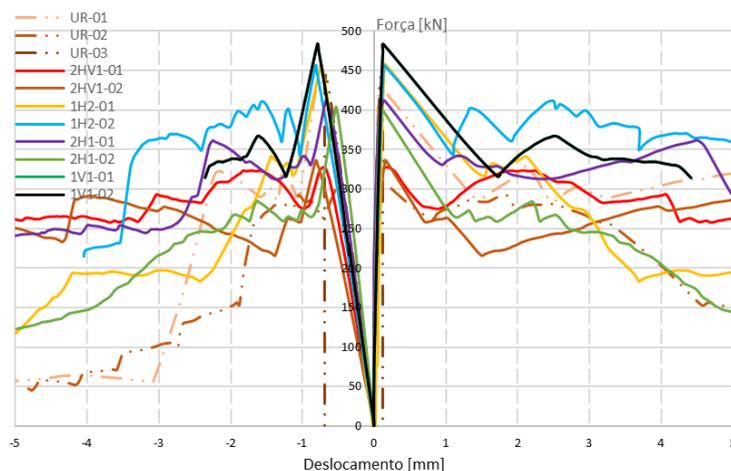


Figura 7: Diagramas força-deslocamento obtidos nos ensaios das paredes com argamassa forte

De uma forma geral, os modelos apresentam um comportamento praticamente linear até ao início da fendilhação, caindo depois a força de modo relativamente abrupto até um determinado nível, a partir do qual a perda de resistência ocorre já de forma mais progressiva.

Em qualquer dos elementos reforçados, verificou-se que os varões de reforço eram fortemente solicitados à flexão e ao corte (dobravam), acabando, em muitos casos, por atingir a rotura. Como é sabido, os varões metálicos apresentam uma muito menor rigidez e resistência face a esforços de flexão e corte quando comparado com a forma como respondem a solicitações de tração pura.

Na Tabela 3, apresentam-se os principais resultados obtidos nos ensaios das paredes com argamassa forte, nomeadamente: força máxima atingida, resistência ao corte, módulo de distorção (ou de corte), densidade de absorção de energia na carga máxima, densidade de absorção de energia após degradação de 20% da carga face ao valor máximo.

A densidade de absorção de energia é dada pelo integral do diagrama da tensão de corte em função da respetiva distorção, ambas calculadas de acordo com a norma ASTM 519/519M-10. De

acordo com esta norma, tem-se que ( $\tau = 0,707 P/A_n$ ), ( $A_n = 0,5 (w+h) t$ ), ( $\gamma = \epsilon_{h,média} + \epsilon_{v,média}$ ) em que  $\tau$  é a tensão de corte a meia altura da secção vertical (diagonal do modelo), onde é máxima,  $P$  é a força aplicada,  $A_n$  é a área efetiva, dada por ( $A_n = 0,5 (w+h) t$ ), em que  $w$ ,  $h$ ,  $t$  representam a largura, altura e espessura do provete, respetivamente, e  $\gamma$  é a distorção, dada por  $\epsilon_{h,média} + \epsilon_{v,média}$ , isto é, pela soma das extensões lineares vertical e horizontal, calculadas com base nos defletómetros instalados nos provetes em cada uma das faces opostas. Os valores apresentados na tabela são os valores médios obtidos para cada tipo de modelo.

Tabela 3: Principais resultados obtidos nos ensaios de compressão diagonal das paredes com argamassa forte

Modelo	Força máxima [kN]	Resistência ao corte [N/mm <sup>2</sup> ]	Módulo de distorção [N/mm <sup>2</sup> ]	Densidade de absorção de energia carga máxima $\times 10^{-3}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Densidade de absorção de energia após degradação de 20% da força $\times 10^{-3}$ [N/mm <sup>2</sup> ]
UR	399	1,29	2148	0,67	2,80
2HV1	334	1,09	1529	0,66	4,69
1H2	460	1,50	1717	0,94	2,75
2H1	410	1,33	2489	0,69	1,60
1V1	438	1,43	2044	0,89	2,35

Na Figura 8 apresentam-se os principais resultados graficamente, para uma mais fácil leitura.

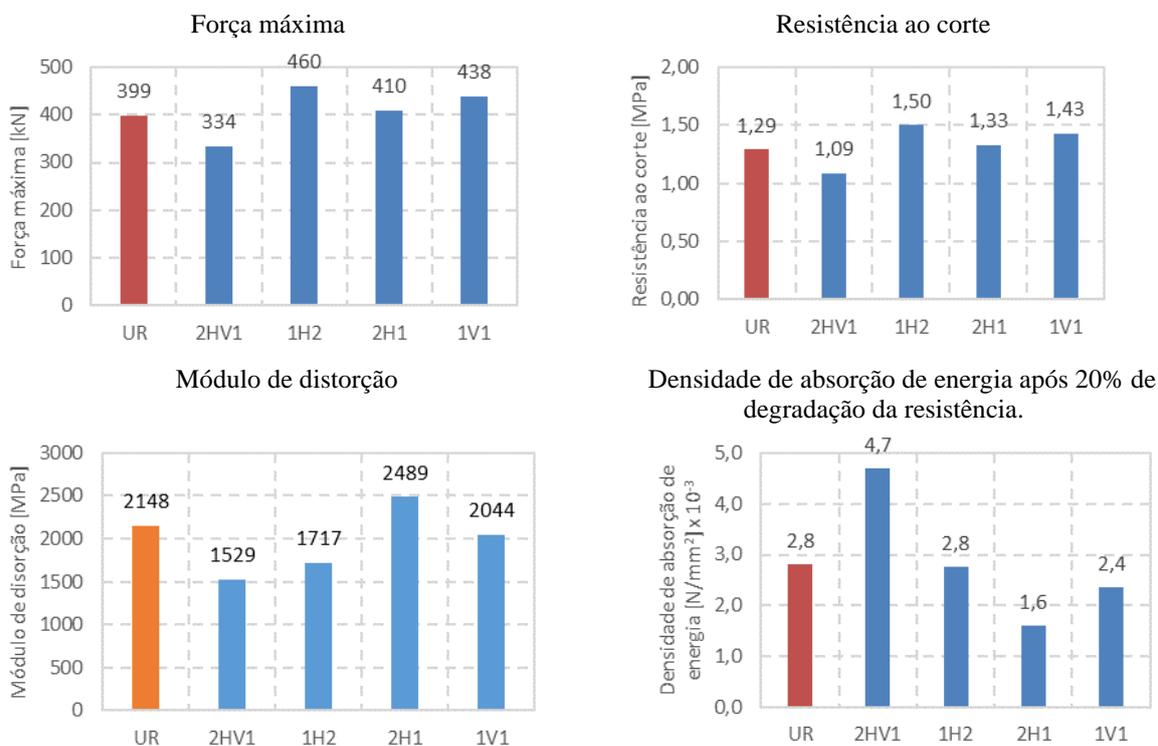


Figura 8: Principais resultados obtidos nos ensaios de compressão diagonal das paredes com argamassa forte

### Resultados obtidos nas paredes com argamassa fraca

No caso das paredes com argamassa fraca, os modos de colapso dos provetes de parede apresentaram diferenças importantes face aos das paredes com argamassa forte. Na Figura 9 apresentam-se alguns dos modelos após o final dos ensaios. Nestes casos, as paredes não funcionaram como um monobloco devido à resistência da argamassa, como no caso das paredes com argamassa forte, onde se gerou essencialmente fendilhação vertical. Em vez disso, devido à menor capacidade resistente da argamassa, os modos de colapso envolvem geralmente o desligamento e escorregamento nas juntas de assentamento (entre os tijolos) que constituem a parede.

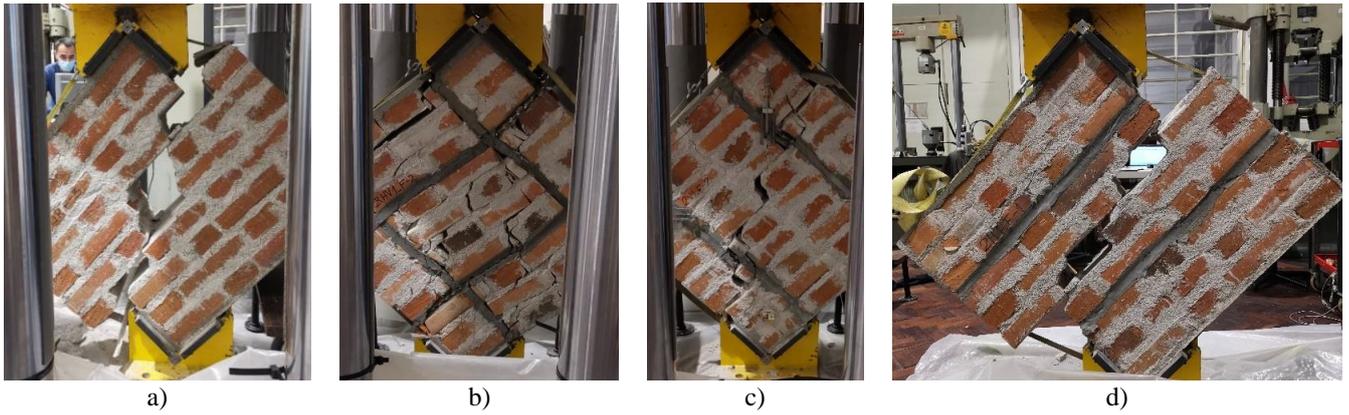


Figura 9: Modo de colapso das paredes com argamassa fraca: a) sem reforço (URF), b) com reforço vertical e horizontal (2HV1), c) com reforço vertical (2V1) e d) com reforço horizontal 2H1)

Na Figura 10, apresentam-se os diagramas força-deslocamento obtidos nestes ensaios. Cada diagrama corresponde a um tipo de reforço em comparação com os modelos não reforçados.

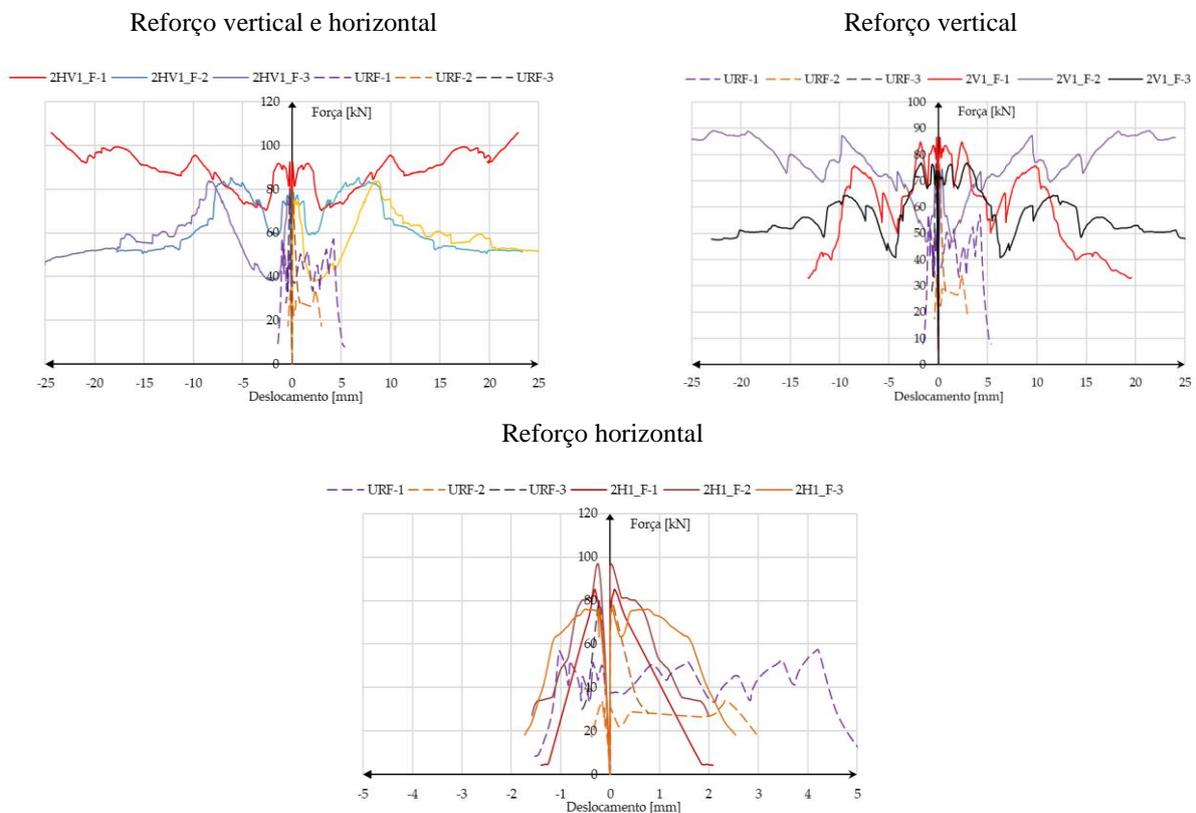


Figura 10: Diagramas força-deslocamento obtidos nos ensaios das paredes com argamassa forte

Os modelos não reforçados apresentam uma resistência e capacidade de dissipação de energia muito reduzida face aos reforçados e face aos modelos com argamassa forte não reforçados. De uma forma geral, os modelos com varões verticais apresentam um comportamento mais favorável, mantendo uma força relativamente elevada mesmo para maiores deslocamentos. Os modelos com reforço horizontal apenas não tiveram capacidade para manter essa força, tendo um comportamento semelhante aos modelos não reforçados.

Na Tabela 4 e na Figura 11 apresentam-se os resultados dos principais parâmetros obtidos nos ensaios das paredes com argamassa fraca.

Tabela 4: Principais resultados obtidos nos ensaios de compressão diagonal das paredes com argamassa fraca

Modelo	Força máxima [kN]	Resistência ao corte [N/mm <sup>2</sup> ]	Módulo de distorção [N/mm <sup>2</sup> ]	Densidade de absorção de energia carga máxima x10 <sup>-3</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]	Densidade de absorção de energia após degradação de 20% da força x10 <sup>-3</sup> [N/mm <sup>2</sup> ]
URF	58	0,21	1123	0,50	0,55
2HV1_F	83	0,33	1263	0,08	11,58
2V1_F	80	0,30	1289	0,16	10,68
2H1_F	87	0,31	1380	0,07	0,56

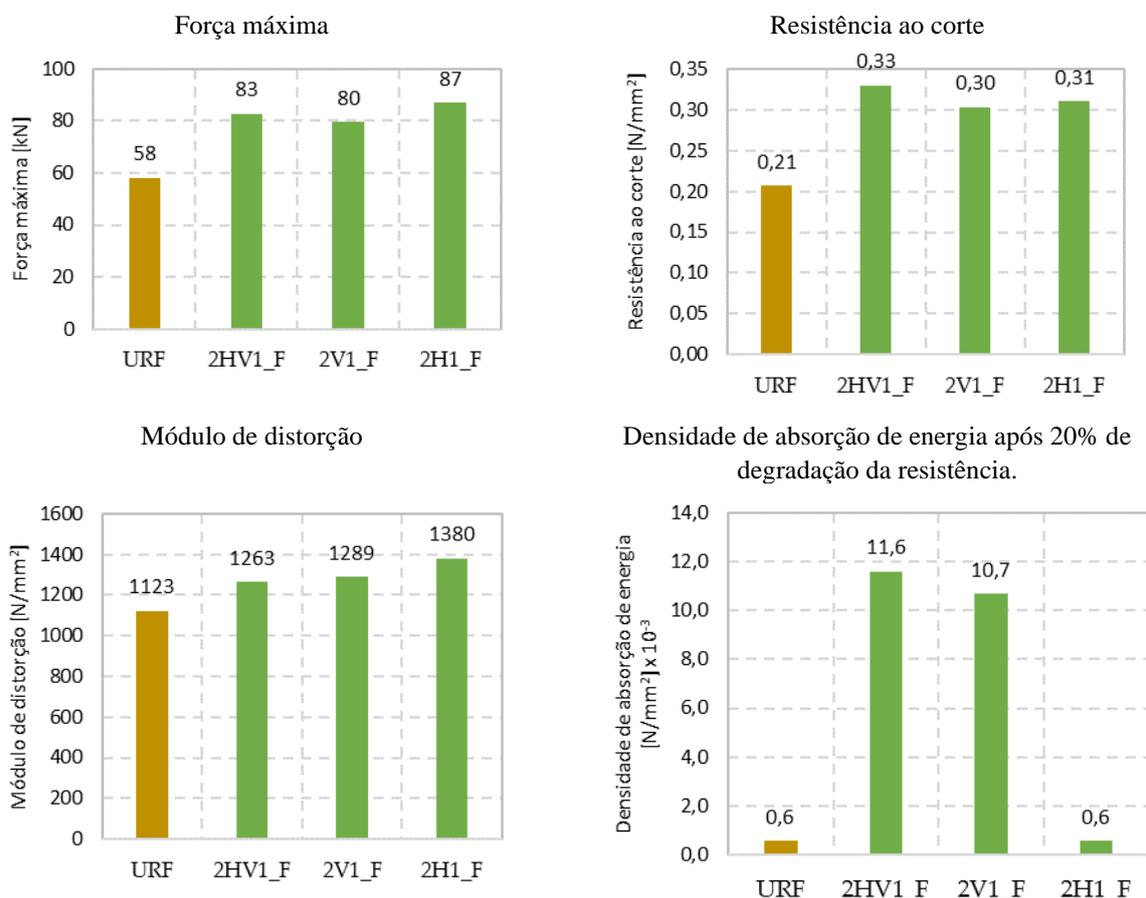


Figura 11: Principais resultados obtidos nos ensaios de compressão diagonal das paredes com argamassa fraca

## Análise e comparação de resultados

Os resultados apresentados mostram que as paredes simples (não reforçadas) construídas com argamassa forte apresentam características mecânicas muito superiores às paredes construídas com argamassa fraca. A resistência ao corte é cerca de 6 vezes superior (1,29 MPa face a 0,21 MPa), o módulo de distorção é quase o dobro (2148 MPa face a 1123 MPa) e a densidade de absorção de energia após perda de 20% da carga é quase 5 vezes superior ( $2,80 \times 10^{-3}$  MPa face a  $0,6 \times 10^{-3}$  MPa).

As paredes com argamassa forte apresentam um desempenho muito superior às paredes com argamassa fraca. Por esse motivo, e conforme mostram os resultados relativos à resistência ao corte das paredes com argamassa forte, os diferentes tipos de reforço com base em varões TSB  $\Phi 6$  não oferecem, em geral, melhorias significativas que possam justificar a sua implementação em paredes tão resistentes. A melhoria mais relevante a assinalar é a capacidade de dissipação de energia acrescida, em 58%, oferecida pela solução 2HV1 (varões TSB  $\Phi 6$  horizontais e verticais em ambas as faces, com 1 varão por junta/rasgo), que passou de  $2,80 \times 10^{-3}$  MPa para  $4,69 \times 10^{-3}$  MPa. Ainda assim, a implementação de tal solução implica abordar as paredes através de ambas as faces e executar rasgos verticais e horizontais, empregando uma elevada quantidade de materiais e mão-de-

obra, para um benefício que não se traduz numa melhoria suficientemente significativa no comportamento sísmico destes elementos que possa justificar os custos envolvidos.

No caso das soluções de reforço das paredes com argamassa fraca com varões TSB  $\Phi 12$ , verifica-se que praticamente todas as configurações de reforço conferem algum aumento dos diferentes parâmetros analisados. A exceção refere-se à capacidade de dissipação de energia da solução 2H1\_F, em que existem apenas varões horizontais, que é praticamente igual à das paredes simples. Isto mostra que a existência de varões verticais é essencial, na medida em que a capacidade de dissipação de energia das paredes é um parâmetro fundamental quando se trata de resistência a ações sísmicas. A reduzida dissipação de energia dos modelos 2H1\_F está relacionada com a existência de escorregamento nas juntas horizontais de argamassa entre as fiadas de tijolos, devido à pior qualidade da argamassa e à inexistência de varões verticais que o impeçam. A solução que acaba por se afigurar como mais adequada é a 2V1\_F, em que são instalados apenas varões verticais com um aumento de desempenho comparável à solução 2HV1\_F, em que são também instalados varões horizontais, implicando maiores custos em mão-de-obra, materiais e prazos de execução, sem um ganho muito significativo face à solução 2V1\_F.

## Conclusões

No estudo apresentado nesta comunicação foi realizada uma campanha experimental para aferir o desempenho de soluções de reforço sísmico (ao corte) de paredes de alvenaria de tijolo cerâmico com varões helicoidais de aço inox. O reforço foi aplicado em várias configurações em dois tipos de parede, um construído com uma argamassa forte, outro com uma argamassa fraca.

O reforço das paredes com argamassa forte realizado com varões de 6 mm de diâmetro nominal apresentou melhorias do comportamento das paredes pouco relevantes, não se considerando justificável a sua implementação em elementos deste tipo.

No caso do reforço das paredes com argamassa fraca realizado com varões de 12 mm de diâmetro ocorreu, em geral, uma melhoria do comportamento mecânico das paredes, sobretudo no que se refere à capacidade de dissipação de energia, um parâmetro fundamental no comportamento sísmico. A implementação desta solução em paredes mais “fracas” pode, por isso, ter interesse prático no âmbito do reforço sísmico global de edifícios antigos.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia, através do financiamento do projeto PTDC/ECI-EGC/30567/2017 “RESIST-2020 - Reabilitação Sísmica de Edifícios Antigos de Alvenaria-Betão”. Agradece-se ao LNEC, parceiro do projeto RESIST-2020, pela disponibilização dos meios técnicos e humanos para a realização dos ensaios experimentais apresentados nesta comunicação. Agradece-se também o apoio das empresas Helifix (UK) e Tramo (Portugal) pelo apoio técnico prestado e pelo fornecimento dos materiais da solução de reforço.

## Referências

- [1] EN 1015-11 (2019), Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar.
- [2] Demaj, Armando, António Sousa Gago, Ana Isabel Marques, and João Gomes Ferreira, *In-Plane Seismic Behavior of Brick Masonry Walls Reinforced with Twisted Steel Bars and Conventional Steel Bars*, Buildings 12, no. 4, (2022) 421, <https://doi.org/10.3390/buildings12040421>
- [3] Demaj, Armando, António Sousa Gago, Ana Isabel Marques, and João Gomes Ferreira, *Shear performance of brick masonry walls reinforced with twisted steel bars*, submitted to Case Studies in Construction Materials in October 2022.

- [4] ASTM E519/E519M-10. (2010) Standard test method for diagonal tension (shear) in masonry assemblages. American Society for Testing Materials, USA.

## Melhoria de desempenho do ETICS, com base em lã mineral, por homogeneização da superfície de interação entre componentes

CARDOSO Diogo<sup>1,a</sup>, FLORES-COLEN Inês<sup>1,b</sup>, PEREIRA Manuel<sup>1,c</sup>,  
FERREIRA Pedro<sup>2,d</sup>, SEQUEIRA Pedro<sup>2,e</sup> e SILVA Luis<sup>2,f</sup>

<sup>1a,b,c</sup> DECivil, Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, nº 1, 1049-001 Lisboa

<sup>2d,e,f</sup> Saint-Gobain Portugal S.A., Zona Industrial Taboeira, 3800-055, Aveiro, Portugal

<sup>a</sup>diogo.filipe.lopes.cardoso@tecnico.ulisboa.pt, <sup>b</sup>ines.flores.colen@tecnico.ulisboa.pt,  
<sup>c</sup>mfcpc@tecnico.ulisboa.pt, <sup>d</sup>pedro.ferreira@saint-gobain.com, <sup>e</sup>pedro.sequeira@saint-gobain.com,  
<sup>f</sup>luis.silva@saint-gobain.com

**Palavras-chave:** ETICS, Lã Mineral, Camada de Base, Otimização de Interface.

**Resumo.** O ETICS é amplamente reconhecido no mercado como solução de excelência no revestimento de fachadas, pelo seu suporte ao conforto térmico, otimização de consumo energético e pelo próprio desempenho mecânico e estético, com vantagens inerentes. Porém, apresenta algumas limitações, uma das quais relacionadas com a reação ao fogo que, em parte, é melhorada pela utilização de materiais isolantes de base mineral, como a lã de vidro. Face a esta conjectura, admite-se um número crescente, mas ainda limitado na totalidade de ETICS, de casos com utilização deste material como isolante. Esta experiência crescente permite, por outro lado, conhecer fatores mais críticos na aplicação e sucesso deste sistema em concreto, sendo um deles relacionado com casos de observação de falta de aderência em pontos aleatórios da fachada. Este trabalho elabora e apresenta uma metodologia de trabalho que tenciona apresentar a causa para a anomalia e uma proposta de minimização ou eliminação da mesma, e que assenta na hipótese de otimização por homogeneização de absorção da superfície da placa isolante.

### Introdução

A utilização de materiais isolantes, em sistemas de revestimento de fachadas e coberturas é uma técnica frequentemente utilizada na melhoria do desempenho energético dos edifícios, proporcionando a diminuição da necessidade de consumo de energia para aquecimento e arrefecimento dos espaços interiores. Frequentemente, são incorporados num contexto de um Sistema de Isolamento pelo Exterior (ETICS), muito comum na Europa. Um dos materiais que é frequentemente utilizado para este revestimento é a lã mineral que, para além de ser considerado um bom isolante, é um material que garante o isolamento sonoro, uma boa resistência ao fogo e ainda é um material cujo impacte ambiental é inferior ao de outros materiais, tais como o EPS e o XPS. A lã mineral, sob as formas de lã de rocha ou vidro, é um material classificado segundo a EN 13162, incombustível, que se apresenta numa estrutura de fibras entrecruzadas numa estrutura porosa e flexível. Como parte de um sistema ETICS, existe um conjunto de componentes, além do isolante, como uma argamassa de base mineral ou orgânica, usada para fixação e barramento dos materiais, neste caso, reforçada com rede de fibra de vidro com tratamento alcalino, outros materiais de suporte à fixação, como buchas para ancoragem mecânica e, finalmente, soluções de revestimento final, que podem incorporar um primário. Como solução de revestimento de fachadas, além da função de isolamento térmico, deverão garantir outras funcionalidades próprias deste elemento construtivo, como são a impermeabilização e a estética. Assim, a própria EAD 040083-00-0404 define requisitos mínimos de desempenho como sistema e como componentes isolados, cuja garantia de cumprimento deverá conduzir a períodos de vida útil mínimos de 25 anos [1,2].

Relativamente às argamassas de camada de base, são constituídas por uma mistura de um ligante (mineral, orgânico ou ambos), agregados específicos e aditivos/adjuvantes, como éteres de celulose (como suporte à reologia da argamassa, tempo aberto e de presa), outros reológicos como

bentonites, fibras de celulose, estearatos/oleatos como agentes hidrofóbicos e fibras acrílicas para aumentar a sua flexibilidade, resistência à fissuração em fase plástica e fase endurecida durante ações de impacto. O seu desempenho, como material independente, é determinado pela EN 998-1 para o caso de argamassas de ligante mineral, que destaca propriedades como a resistência à compressão, condutibilidade térmica e absorção de água por capilaridade. Em contexto de sistemas de isolamento térmico de fachadas (ETICS), que se submetem à EAD 040083-00-0404, e que implica um conjunto de avaliações e requisitos mínimos entre a camada de base (que se impõe ser armada com uma rede de fibra de vidro) e o painel isolante. Por inerência à experiência adquirida nos ETICS, é razoável admitir a relevância da camada de base no comportamento global da solução, com particular destaque à resistência ao impacto e à fissuração e capacidade de impermeabilização do sistema. A maioria de desenvolvimento relativamente a estes materiais, implica o estudo da concentração e tipo de resinas poliméricas combinadas com o ligante mineral (cimento Portland e/ou cal) de forma a otimizar o desempenho nestas propriedades em particular. A sua relação com a rede de reforço (tipicamente, malha de fibra de vidro, 4x4mm, 160g/m<sup>2</sup>) é igualmente relevante, e esta opção em particular justifica-se pelo melhor compromisso entre a capacidade de aderência da argamassa ao material isolante e a garantia de uma resistência à tração/impacto aceitável [2,3].

Na verdade, a garantia de desempenho do sistema ETICS só é alcançada quando se garante uma compatibilidade química, física e mecânica entre todos os seus componentes. Um dos casos mais críticos que pode condicionar tal compatibilidade prende-se com a relação entre a camada de base e o isolante de lã mineral que, pela sua elevada repelência, tende a prejudicar a “molhabilidade” da argamassa à sua superfície, condicionando o resultado final ao nível de aderência e compatibilidade de materiais. Também é relevante considerar que, raramente se consideram propriedades específicas dos materiais para a interpretação do seu desempenho, embora se admita em alguns estudos que a retração ou módulo de elasticidade da argamassa podem estar na origem de alguns problemas associados a fissuração (no caso do módulo de elasticidade, é o próprio EAD que identifica o valor de 8GPa como valor máximo recomendável para um resultado eficaz). Adicionalmente, a aplicação da camada de base sobre a superfície da lã de vidro, revela alguns problemas tais como a dificuldade no espalhamento da argamassa sobre a respetiva superfície e a falta de aderência em zonas pontuais na interface dos dois materiais, que se demonstra não só pelos valores baixos da tensão de rotura, como também no aparecimento de certas anomalias, tais como empolamentos e descolamentos. Considerando a problemática específica de compatibilidade entre uma camada de base mineral e o isolante de lã como uma questão complexa, o trabalho em questão foi orientado no estudo de interpretação de causas para o efeito e apresentação de soluções de melhoria de interface [1,4].

Admite-se que as causas principais para esta anomalia se relacionam, por um lado, com a elevada hidrofobicidade da superfície da lã mineral, que tende a repelir a argamassa, sobretudo durante a fase de aplicação do estado fresco e, por outro lado, pelo facto de se observar heterogeneidade elevada na superfície da lã, causando zonas de fácil ou difícil ligação da argamassa, consoante a existência ou ausência de alguma hidrofiliidade, conduzindo a zonas mais ou menos ligadas. Tal processo, faz com que o material não tenha um comportamento constante ao longo da superfície de contacto com a argamassa de camada de base, resultando em anomalias associadas à fraca aderência entre os dois e em roturas com comportamentos bastante heterogéneos (figura 1), não sendo por isso possível definir um padrão de rotura neste isolante. A prática empírica de pré-humedecimento da superfície da lã mineral revela-se como uma variável estratégica na melhoria de compatibilidade com a argamassa de camada de base. Considera-se que a humedificação da superfície da lã, por melhorar a hidrofiliidade geral resulta numa maior homogeneização na superfície do isolante, sem condicionar negativamente as ligações com a argamassa, também ela hidrofílica (no sentido contrário, a tentativa de hidrofugar por completo toda a superfície piorou a compatibilidade do estado fresco, pela maior repelência), no âmbito do projeto de investigação. Porém, é questionável se a utilização de água na interface dos dois materiais diminui a aderência da argamassa no estado endurecido; ou, se existirá algum limite de presença de

água após o qual delimita tal interação e, finalmente, se é possível melhorar o processo de humedecimento que se revela difícil dada a elevada hidrofobicidade da lã mineral e que resulta em repelência forte durante a aplicação de água [5,6].

Neste sentido, a investigação continuou com o propósito de perceber esta interação entre a lã de vidro, a água e a argamassa. Com isto, os trabalhos desenvolvidos ao longo deste projeto de investigação, tiveram como principal objetivo desenvolver uma técnica que permitisse melhorar o espalhamento da argamassa sobre a superfície da lã de vidro e a sua aderência no estado seco.



Figura 1: Arrancamento de filamentos da lã de vidro quando a argamassa é aplicada na superfície seca. As figuras a), b) e c) são resultados de alguns testes da aplicação com espátula

### Metodologia experimental

A metodologia experimental adotada consistiu na aplicação de uma argamassa de camada de base, constituída por cimento, resina redispersável, agregados de sílica, agentes reológicos e hidrófugos, sobre placas de lã de vidro em diferentes condições de preparação prévia (figura 2):

- Aplicação direta, sem aplicação de qualquer humedecimento prévio.
- Aplicação da camada de base após aplicação prévia de uma solução aquosa com diferentes concentrações de agente molhante (0,01, 0,02, 0,05 e 0,1%).

As aplicações da solução aquosa foram realizadas com auxílio de um rolo de pintura, com 3 a 5 passagens por caso. Após um período entre 10 a 15 minutos, aplicou-se a argamassa de camada de base numa espessura entre 3 e 5mm e deixou-se em cura a 55% Hr e 22°C durante um período mínimo de 7 dias. Após este período procedeu-se ao ensaio de aderência por tração perpendicular, por corte de uma área de 10x10cm, aplicação de um cerâmico sobre a mesma, e a aplicação de um disco metálico para servir de suporte à ligação ao dinamómetro de 16 kN (figura 3).

Em paralelo, relativamente ao conjunto lã de vidro e às várias soluções aquosas de pré-humedecimento, fizeram-se ensaios de absorção de água por capilaridade como forma de avaliar a velocidade e a extensão de humedecimento da superfície do isolante. Por outro lado, este ensaio também serviu para avaliar o quanto uma extensão elevada de humedecimento se poderá apresentar como negativa, por corresponder a um excesso de água absorvida e conseqüente degradação da própria lã mineral. Finalmente, fizeram-se ensaios de absorção de água por capilaridade a partir do contato de uma amostra de lã mineral (30x30x6cm) com um filme de solução aquosa com diferentes percentagens de agente molhante.



Figura 2: Preparação dos provetes de análise por aplicação da solução aquosa com e sem agente molhante, seguida de aplicação da argamassa de camada de base



Figura 3: Preparação dos provetes de análise por aplicação da solução aquosa com e sem agente molhante, e tipologias de rotura dos ensaios de aderência

A lâã mineral (de vidro) utilizada para os ensaios experimentais foi o *webertherm clima 34*, um painel rígido de alta densidade de lâã de vidro, não hidrófilo, com uma condutibilidade térmica de  $0,034\text{W}/(\text{m.K})$ , absorção de água a curto prazo menor que  $1\text{kg}/\text{m}^2$  (EN 1609) e uma resistência à compressão de  $15\text{kPa}$  (EN 826).

A argamassa de camada de base usada foi o *webertherm pro*, que corresponde a uma mistura de cimento Portland, areias de sílica, polímero redispersável e adjuvantes orgânicos como éter de celulose, estearatos e fibras sintéticas. Tem uma massa volúmica endurecida entre  $1200$  e  $1300\text{kg}/\text{m}^3$ , absorção de água classe W2 e aderência sobre lâã mineral superior a  $0,08\text{N}/\text{mm}^2$  (rotura pelo isolante), testes realizados segundo os métodos ensaios descritos pela EN 998-1 ou pela EAD 040083-00-0404.

O agente molhante usado para a realização dos testes é um éster polisfosfórico de aquiléter, emulsionável à água, com extrato seco de 98% [7,8].

## Resultados e discussão

As tabelas 1 e 2 apresentam os resultados obtidos relativamente ao volume de água absorvido, velocidade de absorção, altura de lâmina de água absorvida pela lâã mineral e a percentagem mássica de água retida após os ensaios de capilaridade realizados. Os resultados são apresentados em função da percentagem de agente molhante adicionado e para vários tempos de absorção realizados. A tabela 3 apresenta os resultados de absorção, após 2 minutos, em função da percentagem de agente molhante presente na água, mas a partir de aplicação com rolo de pintura, por forma a aproximar-se de uma situação de aplicação real.

Tabela 1: Resultados de absorção de água por capilaridade após 15 minutos (900s) para as soluções aquosas relativamente à lã de vidro, em função da concentração de agente molhante

Agente molhante (%)	Volume absorvido (mL; %)	Velocidade absorção (mL/s)	Altura de lâmina de solução absorvida (mm)
0	0	0	0
0,02	60; 20	0,07	6
0,05	70; 23	0,08	9
0,07	110; 37	0,12	10
0,10	155; 52	0,17	11

Tabela 2: Resultados de absorção de água por capilaridade após 24h para as soluções aquosas relativamente à lã de vidro, em função da concentração de agente molhante

Agente molhante (%)	Volume absorvido (%)	Altura de lâmina de solução absorvida (mm)
0	0	0
0,02	100	> 12
0,05	100	> 12
0,07	100	> 12
0,10	100	> 12

Tabela 3: Medição da absorção da mistura com agente molhante após 2 minutos da aplicação com o rolo

Agente molhante (%)	Mi (g)	Mf (g)	% aumento massa
0	294	314	7
0,02	272	334	23
0,05	300	488	63
0,07	280	508	81
0,10	282	532	89

No sentido de melhorar o processo de humedecimento, testou-se a adição de um agente molhante à água. Este ensaio permitiu concluir que a quantidade de agente molhante na mistura de humedecimento influencia de forma direta a velocidade de absorção da lã, o que significa que quanto maior for a quantidade de agente adicionado, maior será a velocidade de absorção, mesmo quando a aplicação é realizada por rolo de pintura (tabela 3). Nos valores obtidos para as tabelas 1 e 2, a velocidade varia desde 0.07 ml/s até 0.17 ml/s, mantendo-se a amostra sem agente molhante totalmente hidrofóbica, não registando por isso qualquer tipo de absorção. No entanto, apesar do agente molhante influenciar a velocidade de absorção, é ainda necessário avaliar se este limita a capacidade de absorção da lã de vidro, isto é, se a lã em contacto permanente consegue absorver toda a mistura ou se a quantidade de agente molhante limita a quantidade absorvida. E, na verdade, os resultados obtidos, não obstante apontarem para o humedecimento como um fator positivo para melhorar a compatibilidade com a camada de base, também evidenciam que, com tempo de exposição exagerado ou com excesso de agente molhante, o volume de água absorvido pode ser elevado e contribuir para degradação do isolante (figura 4).



Figura 4: A mistura de água com 0.1% de agente molhante resulta em absorção de água rápida e níveis elevados, que resultará num material que perde hidrofobicidade e durabilidade

Tendo em consideração as observações dos ensaios de absorção capilar, é perceptível que a quantidade de agente a ser utilizada não deverá exceder os 0.05%, pois a absorção excessiva poderá prejudicar o desempenho do material enquanto isolante. Neste sentido, foram realizados outros ensaios de absorção capilar, com medições mais frequentes para amostras de lã de vidro em contacto direto com misturas de 0.03% e 0.05% de agente molhante, estando os resultados expressos na figura 5. Para além disso, foi necessário avaliar se as propriedades de absorção do sistema (lã + camada de base) seriam alteradas devido à utilização do agente molhante no humedecimento da superfície de contacto entre as duas camadas. Assim, foram realizados os mesmos ensaios de absorção para amostras de lã + camada de base, estando os resultados expressos na figura 6.

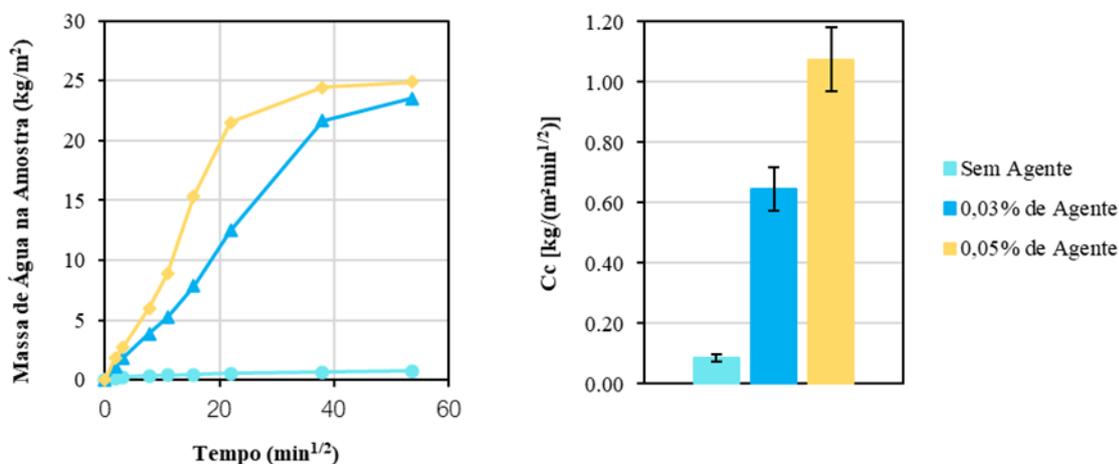


Figura 5: Curvas de absorção capilar para as amostras de lã de vidro em contacto com as misturas com 0.03% e 0.05% de agente molhante

A análise das curvas da figura 5, demonstram que a utilização do agente molhante proporciona uma alteração significativa das propriedades de absorção capilar da lã de vidro, verificando-se que a absorção no fim do ensaio é aproximadamente 20 vezes superior nas amostras com agente em comparação com as amostras que estiveram em contacto com a mistura sem agente. Por outro lado, a utilização de maiores quantidades de agente molhante proporciona uma absorção mais rápida nos primeiros momentos, havendo posteriormente uma tendência para um ponto de saturação, relativamente próximo nos dois tipos de amostras. As curvas de absorção capilar, para as amostras de lã + camada de base (figura 6) demonstram em primeira instância que, no sistema, a utilização do agente molhante não proporciona diferenças tão significativas, o que indica que a utilização do agente molhante não afetará, à priori, a capacidade de absorção de um ETICS.

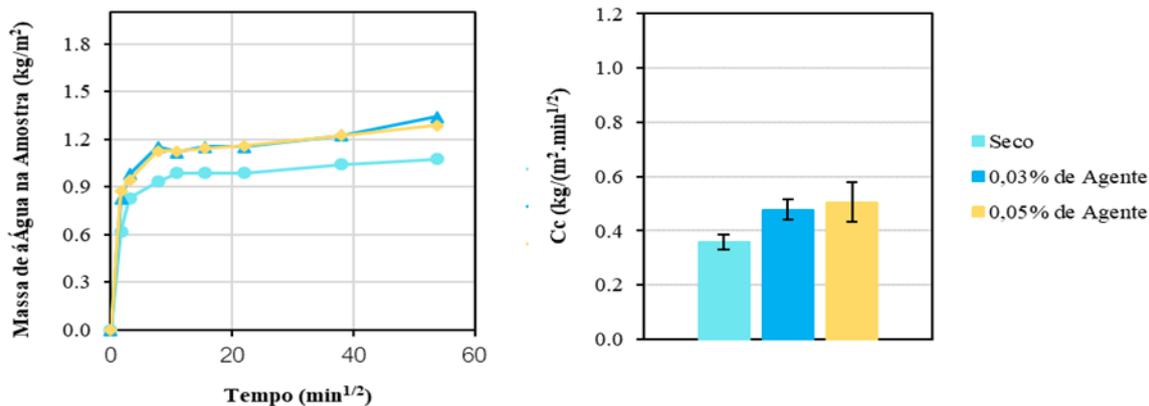


Figura 6: Curvas de absorção capilar para as amostras do sistema (lã + camada de base)

A tabela 4 e figura 7 apresentam resultados respetivos aos ensaios de tração (*pull-off*) para as várias variáveis em estudo. Os resultados confirmam a tendência para o efeito positivo do humedecimento relativo da lã mineral a dois níveis: i) os valores de aderência tendem a ser superiores; e ii) a tipologia de rotura tende a ser mais profunda no próprio isolante, sugerindo maior compatibilidade química e física com a argamassa de camada de base. Adicionalmente, a utilização de agente molhante na solução usada para o humedecimento aponta para uma redução na variabilidade dos resultados, com menor desvio padrão, o que também é corroborado por maior constância da tipologia de rotura ao longo de toda a área de amostra em estudo.

Os resultados obtidos indicam que o agente molhante atua sobre a lã de vidro, alterando as suas propriedades hidrofóbicas e, quanto maior a sua percentagem, maior será a velocidade de absorção da própria lã. Por outro lado, a quantidade de agente molhante não limita a capacidade de absorção da lã uma vez que, independentemente da quantidade de agente molhante usada, a lã absorveu toda a mistura com a qual está em contacto, apenas em tempos diferentes, indicando que a percentagem do agente condiciona, sobretudo, a velocidade de absorção de água. Com efeito, com a utilização de maiores quantidades de agente molhante, obtém-se maior absorção de água pela lã em períodos menores.

Tabela 4: Resultados de tração perpendicular (ensaio pull-off) para as diferentes combinações testadas ao nível do pré-humedecimento da lã mineral

Agente molhante (%)	Aderência (MPa)	Desvio padrão (MPa)	Tipologia de rotura
0	0,060	0,006	Coesiva no isolante (mais profunda)
0,03	0,070	0,003	
s/ humedecimento	0,056	0,005	Coesiva no isolante (superficial)

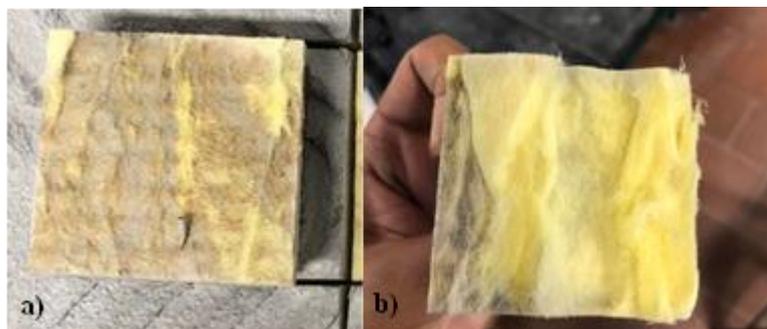


Figura 7: Resultado do ensaio de tração na (a) superfície seca e na (b) superfície húmida com agente molhante, ao nível da tipologia de rotura obtida

O agente molhante em causa, corresponde a um tensoativo, que atua diminuindo a tensão superficial da água que, em contacto com a superfície da lã, faz com que as gotas de água se

desintegram e sejam absorvidas pelos poros de menores dimensões do isolante. Esta alteração das propriedades de absorção da lã mineral, proporciona a homogeneização da superfície de contacto entre as duas camadas, facilitando a ligação entre as mesmas. Para além disso, o processo de humedecimento proporciona uma diminuição do atrito entre o mecanismo de espalhamento da argamassa e a própria superfície, facilitando o respetivo mecanismo e impedindo que filamentos de lã sejam arrancados durante o mesmo processo. Também, os ensaios *pull-off* demonstraram que a utilização da técnica de humedecimento permite melhorar a aderência através de resultados com roturas mais coesivas, isto é, com maiores quantidades de lã arrancadas durante o processo de rotura, no entanto não foram registadas melhorias no que respeita ao valor da tensão de rotura. Contudo, para além da respetiva técnica permitir que a rotura seja mais coesiva, verifica-se que existe uma aproximação daquilo que se descreve como um padrão de rotura, havendo uma maior homogeneização no perfil de rotura das várias amostras.

## **Conclusões**

O estudo em questão elabora e apresenta uma metodologia de trabalho que tenciona apresentar a causa para anomalia específica de empolamento de camada de base sobre isolante de lã mineral e uma proposta de minimização ou eliminação da mesma, que assenta na hipótese de otimização por homogeneização de absorção da superfície da placa isolante. A partir dos trabalhos realizados no âmbito de um projeto de investigação, foi desenvolvida uma técnica de aplicação da camada de base sobre a lã, que permitiu dar uma resposta a estas questões. A técnica em causa, consiste na humidificação prévia da superfície da lã de vidro, com uma mistura de água com 0.03% de um agente molhante, aplicada com o auxílio de um rolo, e aplicação posterior da argamassa sobre a mesma superfície. Este procedimento resulta em valores de tração com maior homogeneidade ao longo de uma superfície de isolante e modos de rotura tendencialmente mais coesivos na própria lã.

Resumidamente, pode assumir-se que a técnica de humidificação com rolo melhora o espalhamento da argamassa sobre a superfície e permite resultados mais coesivos e homogéneos em comparação com a aplicação a seco. Adicionalmente, com a utilização do agente molhante garante-se que a superfície humedece de forma homogénea e facilita o próprio processo de humedecimento. Por outro lado, a utilização deste tipo de agente levanta algumas questões sobre a alteração das propriedades isolantes da lã mineral, com impactos potenciais de colonização biológica ou perda de propriedades isolantes por incremento da condutibilidade térmica. Neste sentido, foram realizados ensaios de absorção capilar e de secagem, que permitiram verificar o impacto do mesmo agente na alteração das capacidades de absorção da lã e do sistema (lã e camada de base). Os resultados permitem concluir que a utilização do respetivo agente proporciona uma alteração significativa na capacidade de absorção da lã mineral, verificando-se que o incremento da sua quantidade resulta maior velocidade de absorção, embora com valores máximos absorvidos finais similares, apenas com diferença do tempo para o efeito, o que implica uma relação ótima a definir em função da relação com a dualidade tempo/quantidade de água adicionada.

A continuidade desta investigação deverá incidir em ensaios de validação a uma escala maior, de modo que se possa fazer uma análise estatística mais detalhada, definir uma metodologia de análise da rotura e avaliar com maior foco os riscos potenciais de um excesso de humedecimento. Em paralelo, considerando a facilidade de processo, sugere-se o estudo de outros adjuvantes que possam resultar em desempenhos técnicos superiores do próprio isolante, sem condicionar as suas vantagens atuais.

## **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.

## Referências

- [1] Bjørn PetterJelle, *Traditional, state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities*, Energy and Buildings, Volume 43, Issue 10 (2011) 2549-256.
- [2] European Assessment Document EAD 040083-00-0404—*External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) with Renderings*; European Organization for Technical Approvals: Brussels, Belgium, 2019.
- [3] EN 998-1: Specification for Mortar for Masonry. Part 1: Rendering and Plastering Mortar; European Committee for Standardization (CEN): Brussels, Belgium, 2010.
- [4] A. M. Freitas, Vasco Peixoto de; Miranda, *Patologias de sistemas de isolamento térmico pelo exterior do tipo ETICS - LFC-IC-282A-2014*, Porto - Portugal, 2014.
- [5] M. Jiříčková, Z. Pavlík, L. Fiala & R. Černý, *Thermal Conductivity of Mineral Wool Materials Partially Saturated by Water*, International Journal of Thermophysics volume 27, (2006) 1214–1227.
- [6] Milena Jiříčková Robert Černý, *Effect of hydrophilic admixtures on moisture and heat transport and storage parameters of mineral wool*, Construction and Building Materials, Volume 20, Issue 6, (2006) 425-434.
- [7] Saint-Gobain Portugal, ficha técnica webertherm clima 34, 2022.
- [8] Saint-Gobain Portugal, ficha técnica webertherm pro, 2022.

## Monitorização de estruturas de construção a partir de varões compósitos entrançados (BCRs)

SOUSA José<sup>1,a</sup>, MOTA Carlos<sup>1,b</sup>, BESSA João<sup>1,c</sup>, CUNHA Fernando<sup>1,d</sup> e FANGUEIRO Raul<sup>1,2,e</sup>

<sup>1</sup>Fibrenamics-Universidade do Minho, Campus de Azurém 4800-058, Guimarães, Portugal

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Têxtil da Universidade do Minho, Campus de Azurém 4800-058, Guimarães, Portugal

<sup>a</sup>joseduarte@fibrenamics.com, <sup>b</sup>cmota@tecminho.uminho.pt, <sup>c</sup>joaobessa@fibrenamics.com, <sup>d</sup>fernandocunha@det.uminho.pt, <sup>e</sup>rfangueiro@det.uminho.pt

**Palavras-chave:** BCRs, CNTs, Piezoresistividade, Monitorização.

**Resumo.** O presente trabalho surge no âmbito de um estudo em que foram desenvolvidos varões de compósito entrançados (BCRs) piezoresistivos através da incorporação de um filamento de fibra de vidro impregnado com nanotubos de carbono (CNTs). Diferentes concentrações mássicas de CNTs [0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2% e 2,5%] foram dispersas em formulações poliméricas de resina epóxi e ácido polilático (PLA). Estas formulações foram, em seguida, utilizadas para impregnar os filamentos de fibra de vidro com pré-tratamento alcalino. O efeito do pré-tratamento alcalino dos filamentos de fibra de vidro dos BCRs foi caracterizado pela técnica de FTIR. O desempenho piezoresistivo dos BCRs funcionalizados foi avaliado usando um set-up dedicado para medir, simultaneamente, a resposta mecânica e elétrica durante cargas de tração cíclicas. Através dos resultados, verificou-se que o sensor piezoresistivo estrutural obtido apresenta uma sensibilidade adequada para substituir varões de aço de alta densidade e suscetíveis à oxidação nas armaduras de betão, por uma estrutura de monitorização inteligente.

### Introdução

Preocupações com a durabilidade de armaduras de betão em aço relacionadas com elevados níveis de carga e exposição a elementos corrosivos, impulsiona respostas tecnológicas inovadoras que incluem a implementação de varões poliméricos reforçados com fibras, uma nova classe de material não corrosivo, de alta resistência mecânica e composta por materiais leves [1], [2], [3]. Esta é uma tecnologia promissora que pode diminuir o tempo de instalação em obra e, sendo quimicamente inerte, mitiga o fenómeno de corrosão. Os polímeros reforçados com fibra de vidro surgem como a solução mais económica [4]. Em comparação com os metais, os compósitos de fibra de vidro, com composição e orientação adequadas, têm uma resistência semelhante à do aço e são mais rígidos do que o alumínio [5]. Estima-se que até 2020 o mercado de compósitos gerou 90 mil milhões de euros a nível global, com a fibra de vidro a ser utilizada como reforço em 90% da produção de todos os compósitos reforçados com fibras [6].

As aplicações de sensores aumentaram drasticamente de 1980 para os dias atuais, onde foi estudada uma grande e ampla aplicabilidade nas nossas rotinas diárias, devido aos avanços recorrentes neste campo da tecnologia [7]. Um sensor deve satisfazer algumas características essenciais, tais como, ser de pequenas dimensões e multifunções, apresentar baixo custo, alta sensibilidade e fiabilidade. Uma grande área de superfície específica, bem como uma estrutura altamente porosa, são necessárias para uma resposta rápida em função do tempo [8]. Para aplicações de deteção adequadas, os sensores devem replicar o seu comportamento de resposta em função do tempo, para permitir a sua reutilização [9]. Sensores piezoresistivos dependem da variação de pressão externa que se traduz numa modificação da sua resistência elétrica [10]. Estes materiais têm uma grande variedade de aplicações, desde acelerómetros a sensores de pressão [11].

Os nanomateriais apresentam uma posição importante na produção e fabrico de uma grande variedade de *gadgets* e materiais funcionais devido às suas características físicas e químicas que

incluem também elevada resistência mecânica, propriedades estruturais e maior relação área superficial-volume [12]. As nanopartículas de carbono, têm sido amplamente exploradas para objetivos distintos de aplicação, a condutividade elétrica dos materiais poliméricos pode ser potenciada através da incorporação de partículas condutoras, como estruturas de carbono [13]. Os nanotubos de carbono (CNTs) são moléculas cilíndricas que consistem em átomos de carbono especialmente organizados, que resultam numa rede hexagonal de átomos híbridos [14]. As aplicações de CNTs em nanotecnologia incluem principalmente funções de sensorização, que podem monitorizar alterações devido a flutuações na frequência de vibração dos CNTs, cujo seu arranjo atómico hexagonal garante uma elevada condutividade elétrica [15].

A impregnação têxtil [16] e as técnicas de revestimento [17] podem ser utilizadas para funcionalizar a fibra de vidro com uma formulação polimérica em combinação com um nanomaterial condutor, como o CNTs, de modo a promover o comportamento piezoresistivo ao longo de todo o comprimento do filamento. O tratamento alcalino das fibras a partir do NaOH [18] é um método económico e comum para diminuir a hidrofobia, o que facilita a impregnação dos CNTs [19].

Este estudo teve como objetivo otimizar e implementar filamentos de fibras de vidro piezoresistivos em BCRs, através da sua funcionalização com CNTs. Pretendia-se, ainda, obter uma maior compreensão do impacto do tratamento alcalino no processo de funcionalização, bem como a sua influência na condutividade elétrica. Este estudo salvaguarda a repetibilidade de monitorização de estruturas sujeitas a pressões cíclicas, otimização da compatibilidade e conservação do desempenho entre o filamento funcional e os varões compósitos estruturais, resultando numa estrutura de monitorização inteligente com tecnologia piezoresistiva.

## **Materiais e Métodos**

**Materiais.** Respeitante aos materiais utilizados no presente estudo, o filamento de fibra de vidro, com uma massa linear de 100 TEX, foi adquirido à Owens Corning®. Os pellets de NaOH, utilizados no tratamento alcalino dos filamentos de fibra de vidro, pertencem ao fornecedor Normax. Nas formulações de impregnação de funcionalização dos filamentos de fibra de vidro foram utilizados os constituintes: clorofórmio de pureza 99,8% (Sigma-Aldrich®), pellets de PLA (NatureWorks), nanotubos de carbono (Thomas Swan & Company Ltd.) e, por fim, a resina epóxi adicionada foi a Biresin® CR141 da Sika.

**Métodos de funcionalização.** A funcionalização dos filamentos de fibra de vidro iniciou-se com a sua imersão numa solução aquosa de NaOH 4% (m/v) durante uma hora à temperatura ambiente, com agitação mecânica de 350 rpm. As fibras foram, de seguida, lavadas com água destilada, para a remoção de NaOH residual e submetidas a secagem em estufa, a 80°C durante duas horas [20]. Para efeitos de comparação, as amostras sem tratamento alcalino foram submetidas às mesmas formulações de funcionalização que os filamentos com tratamento alcalino.

Com a finalidade de ser comparada a influência de soluções de formulação de funcionalização da matriz a impregnar os filamentos, foi estudada a utilização de bases termoendurecível (epóxi), termoplástica (PLA) e da sua combinação. Assim, os filamentos de fibra de vidro foram impregnados com as formulações a seguir apresentadas (Formulação A, B e C). Estes filamentos foram funcionalizados a partir de matrizes com CNTs, utilizando o método Dip-Pad-Dry, numa gama de [0%, 0,5%, 1%, 1,5%, 2% e 2,5%] CNTs (m/v), utilizando as seguintes formulações:

- **Formulação A:** CNTs dispersos em acetona com epóxi Biresin® CR141 [21], agitação mecânica durante uma hora e banho de ultrassons durante uma hora;
- **Formulação B:** CNTs dispersos numa solução de clorofórmio com PLA 6% (m/v), através de agitação mecânica durante uma hora, seguido de banho de ultrassons durante uma hora;

- **Formulação C:** Combinação de ambas as formulações anteriores aplicando a matriz epóxi Biresin® CR141 como um revestimento às fibras de vidro funcionalizadas com a formulação B.

Esta gama de formulações permite inferir a influência de diferentes comportamentos elásticos em diferentes amostras.

De acordo com a visualização dos filamentos com e sem impregnação de solução de funcionalização, (Figura 1), verifica-se que o processo de Dip-Pad-Dry permite uma distribuição homogénea da formulação em todo o comprimento dos filamentos, esta aplicação foi realizada, aplicando as formulações de funcionalização aos filamentos de fibra de vidro num equipamento *Foulard* vertical, seguido de secagem em estufa a 100°C durante 5 min [16] (Figura 1).

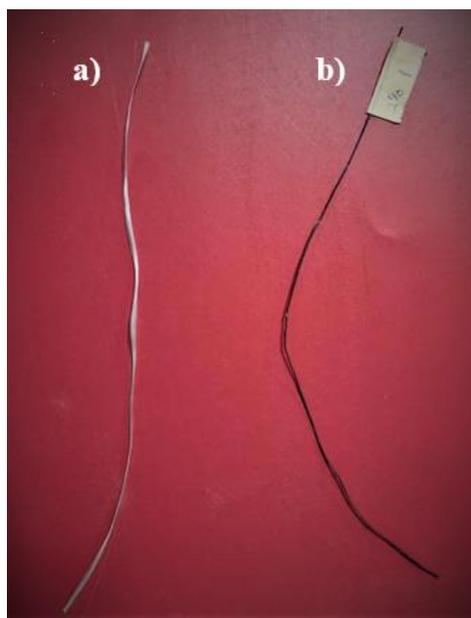


Figura 1: Filamento de fibra de vidro TEX 100 sem impregnação, a) e filamento de fibra de vidro impregnado com Formulação B com 2% CNTs, b)

**Métodos de produção.** A incorporação dos filamentos de fibra de vidro funcionalizados, pelos métodos descritos anteriormente, baseou-se em adicionar o filamento funcionalizado, juntos com os restantes multifilamentos de fibra de vidro que compõem os BCRs. Esta adição é realizada no início do processo de produção dos varões compósitos entrançados, na zona de alimentação das fibras. É possível visualizar, (Figura 2), as diferentes zonas e equipamentos referentes ao processo de produção de BCRs, inclusive a referida zona de alimentação das fibras [22].

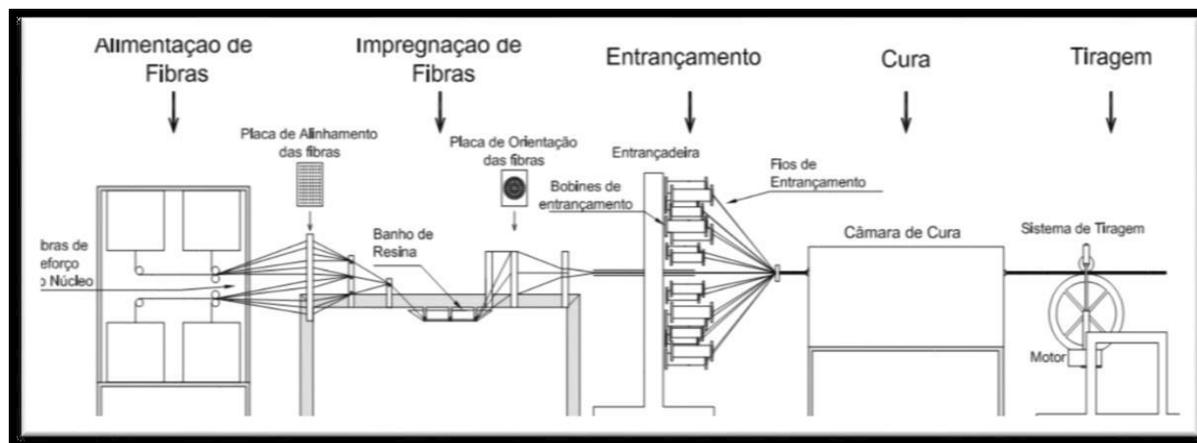


Figura 2: Esquema do processo de fabrico dos Varões Compósitos Entrançados (BCRs) [22]

Os BCRs testados foram produzidos utilizando seis multifilamentos de fibra de vidro (SE1200 9600 [23]) com um filamento, do mesmo material, funcionalizado no seu núcleo. Este conjunto de fibras foi imerso para impregnação em resina epóxi Biresin® CR141. Posteriormente, no entrançamento, as fibras impregnadas foram envolvidas por filamentos de poliéster. Na fase seguinte, as fibras impregnadas e entrançadas passam numa câmara de cura durante 5 min a 140°C. Por fim, os BCRs saem curados, após zona de tiragem, como produto final, disponível para ser seccionado da forma pretendida.

**Métodos de caracterização.** Para avaliar o desempenho dos filamentos com e sem tratamento alcalino após funcionalização, a espectroscopia de infravermelhos por transformada de Fourier (FTIR) permite verificar a presença de CNTs nos filamentos. Os testes de resistividade elétrica foram efetuados com recurso a uma fonte *Keitley 487 Picoammeter/Voltage Source*, através da aplicação de uma diferença de potencial entre -1 a 1 V, a temperatura ambiente. De modo a ser possível medir valores de resistência elétrica, utilizou-se um sistema de elétrodos de cobre, com uma área de elétrodo de (5 x 1 mm<sup>2</sup>) e a distância entre elétrodos de 3mm. São apresentados os equipamentos utilizados para a medição da resistividade elétrica (Figura 3).

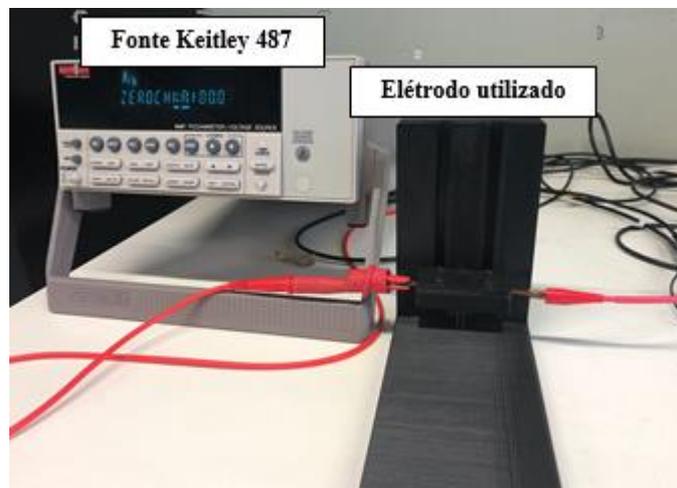


Figura 3: Equipamentos utilizados na medição de resistividade elétrica

O comportamento piezoresistivo dos filamentos de fibra de vidro impregnados com a formulação B apresentada, foi avaliado através de ensaios cíclicos de tração, constituídos por cinco ciclos e velocidade de ensaio de 2mm por minuto, aplicando 0,5% e 1% de extensão ao comprimento entre as mandíbulas do dinamómetro (170mm) e ligando aos elétrodos, com a distância de 1cm no centro do filamento, os terminais de um multímetro digital [24]. O comportamento piezoresistivo foi apenas avaliado em amostras impregnadas com a formulação B, por se tratarem das amostras que apresentaram valores de resistividade mais adequados ao objetivo. Esta explicação surge, mais detalhadamente, no capítulo referente aos resultados deste estudo. Pode ser visualizado o *set-up* utilizado nos ensaios de piezoresistividade na imagem abaixo (Figura 4).

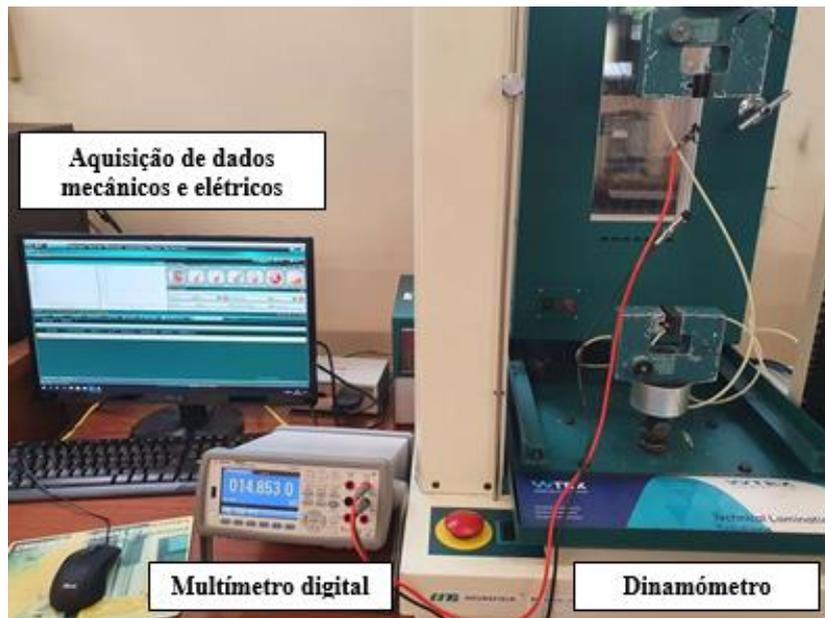


Figura 4: Set-up utilizado nos ensaios de piezoresistividade

Os testes de piezoresistividade foram realizados de forma a determinar-se a capacidade destes filamentos funcionalizados se comportarem como material piezoresistivo. Assim, o comportamento elétrico (resistência elétrica) e mecânico (extensão) do filamento foram avaliados simultaneamente e ao longo dos ensaios cíclicos de tração, para avaliar também a repetibilidade deste comportamento. Após a caracterização e seleção das formulações, com base no seu desempenho, os filamentos de fibra de vidro funcionalizados foram incorporados nos varões compósitos reforçados, aquando da sua produção, de acordo com o método de produção acima abordado.

## Resultados e Discussão

**Caraterização FTIR.** A análise FTIR realizada aos filamentos de fibra de vidro não funcionalizados, com e sem tratamento alcalino foi realizada entre os comprimentos de onda de 4000 a 400  $\text{cm}^{-1}$  e com resolução de 4  $\text{cm}^{-1}$ . A partir do espetro FTIR (Figura 5), detalhado anteriormente, podem ser observados os resultados apresentados de seguida. O espetro demonstra que um pico de absorção é conservado a cerca de 1750  $\text{cm}^{-1}$  para ambas as amostras, correspondente à frequência de alongamento de C=O, assim como a banda a 1050  $\text{cm}^{-1}$  relativa a Si-O-Si, comumente encontrada em fibra de vidro e ainda a banda 1200  $\text{cm}^{-1}$  C-OH de alongamento [25]. A existência de uma banda expressiva a 720  $\text{cm}^{-1}$  para a amostra de fibra de vidro com tratamento alcalino resulta do evento de infravermelhos de flexão Si-OH causada pelo NaOH durante o pré-tratamento alcalino [26], já o pico nos 3400  $\text{cm}^{-1}$  é também característico da vibração de alongamento OH [27]. Verifica-se a partir do mesmo espetro que ambos os picos nos 720  $\text{cm}^{-1}$  e 3400  $\text{cm}^{-1}$  não se aplicam à amostra de fibra de vidro não tratada. Este resultado demonstra a remoção da maioria dos grupos não polares e a implementação de grupos hidroxilo, que promovem a impregnação dos CNTs [28].

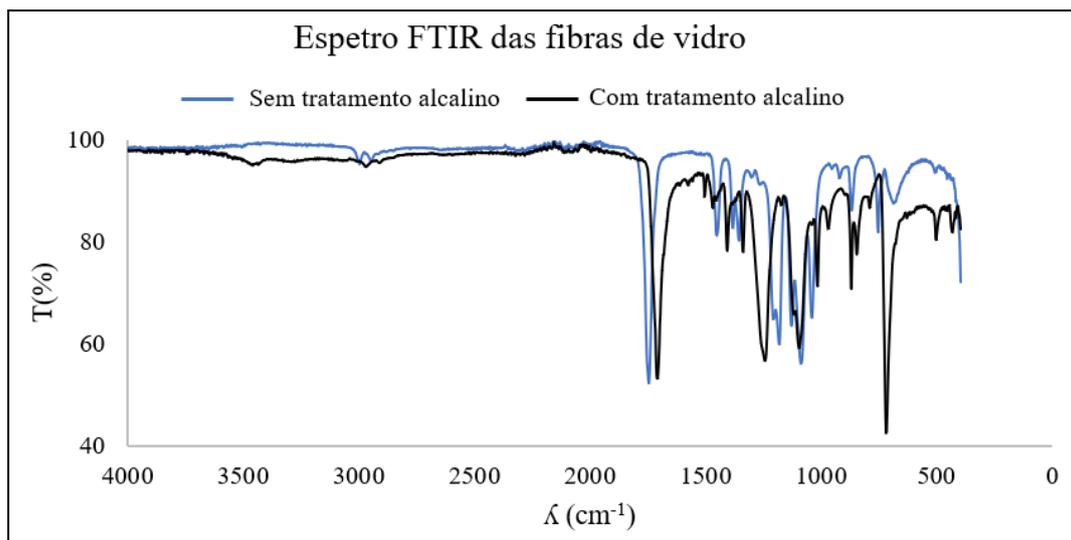


Figura 5: Espectro FTIR das fibras de vidro com tratamento alcalinos, a cor preta e sem tratamento alcalino, a cor azul

**Caraterização elétrica.** Dada a discrepância entre os filamentos, impregnados com as diferentes formulações, a variação da resistividade elétrica destes (Tabela 1), mostra que os melhores resultados são apresentados pelas amostras impregnadas com a Formulação B, as quais demonstraram uma resistividade elétrica mais baixa e, portanto, maior condutividade, resultando numa aplicação para materiais piezoresistivos mais adequada e promissora. Por outro lado, verificou-se a existência, também, com problemas de incompatibilidade na formulação C, retratados pela maior resistividade apurada para a concentração de 2,5% de CNTs em comparação com 2% de CNTs.

Tabela 1: Resistividade elétrica dos filamentos de fibra de vidro funcionalizados

% CNTs (m/v)	R ( $\Omega/cm$ )		
	Formulação A	Formulação B	Formulação C
0.50	1.08E+05	9.07E+03	1.23E+05
1.00	2.67E+04	3.99E+01	4.65E+02
1.50	8.38E+03	4.95E+00	5.56E+01
2.00	4.06E+03	4.24E+00	1.46E+01
2.50	6.36E+02	2.42E+00	2.81E+01

**Influência da concentração de CNTs.** Relativamente aos filamentos de fibra de vidro funcionalizados com a formulação B e com diferentes percentagens de CNTs adicionados, os resultados dos ensaios de piezoresistividade mostram que para as percentagens de 0,5% de CNTs (Figura 6-Figura 7) e 1% de CNTs (Figura 8-Figura 9), não existe uma sobreposição clara entre a variação da resistência elétrica ( $\Delta R/R_0$ ) e a variação da extensão mecânica ( $\Delta L/L_0$ ). Embora exista um padrão para filamentos funcionalizados com 1% de CNTs, a sua resposta elétrica permanece estática para um determinado limiar de extensão. No que respeita aos picos da curva de  $\Delta R/R_0$ , estes sobrepõem-se e são mais consistentes para as amostras com 1,5% (Figura 11) e, mais concretamente, 2% de CNTs (Figura 12-Figura 13). No que diz respeito às amostras de filamentos de fibra de vidro com a adição de 2,5% de CNTs (Figura 14-Figura 15), estas apresentam comportamento piezoresistivo de qualidade inferior em comparação com 1,5% e 2% de CNTs, principalmente no ensaio de 1% de extensão, o que não invalidou a sua utilização na incorporação em BCRs, de forma a ser avaliado o comportamento piezoresistivo nos varões compósitos.

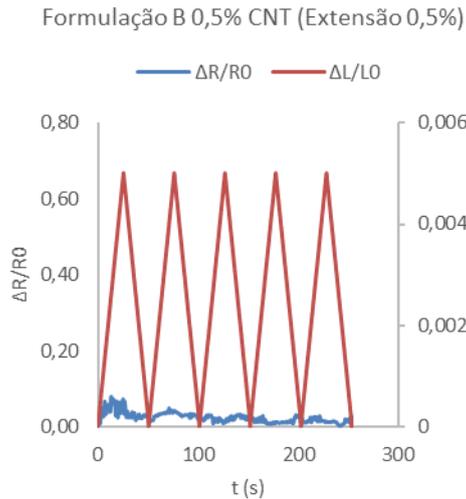


Figura 6: Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 0,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 0,5%

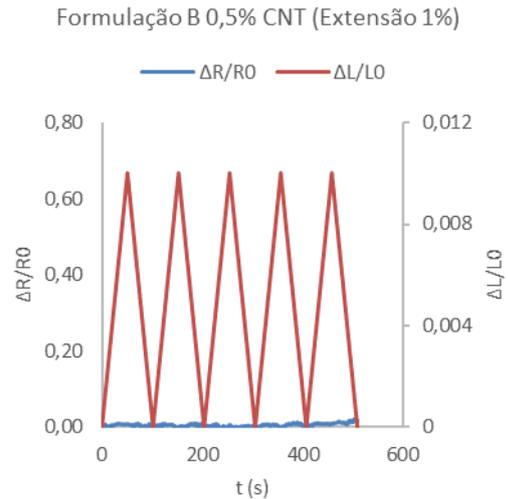


Figura 7: Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 0,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 1%

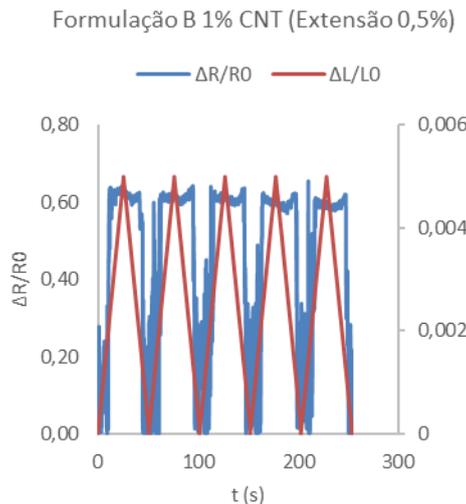


Figura 8: Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 1% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 0,5%

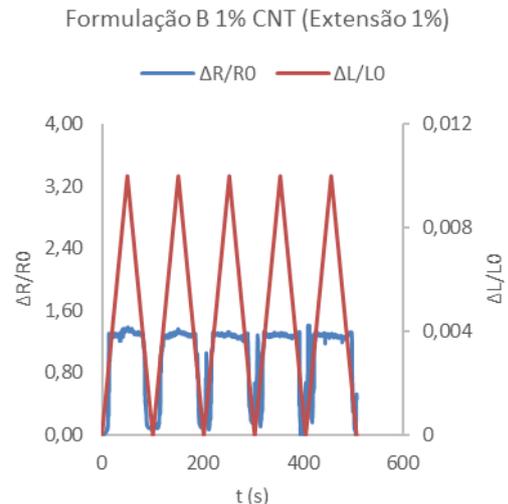


Figura 9: Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 1% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 1%

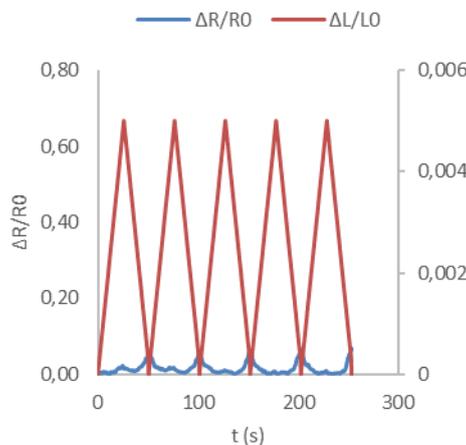


Figura 10: Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 1,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 0,5%

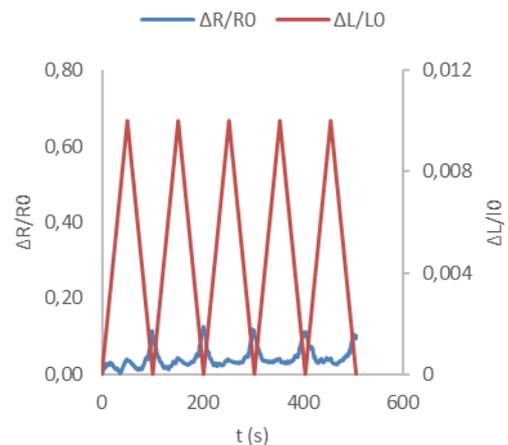


Figura 11: Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 1,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 1%

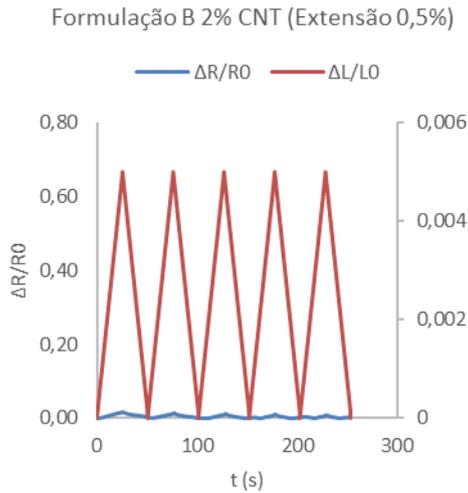


Figura 12: Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 2% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 0,5%

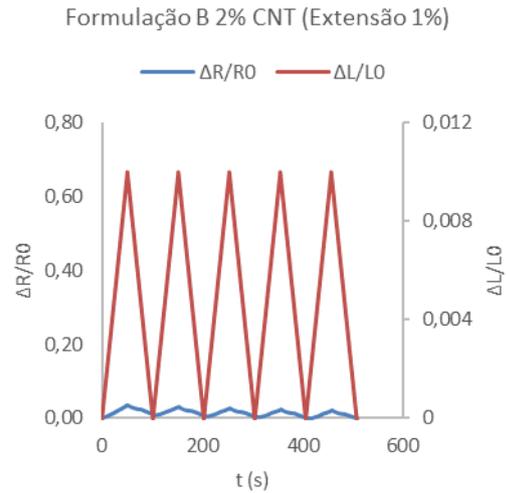


Figura 13: Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 2% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 1%

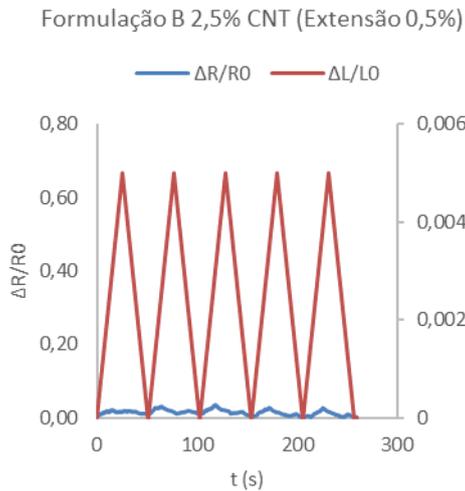


Figura 14: Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 2,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 0,5%

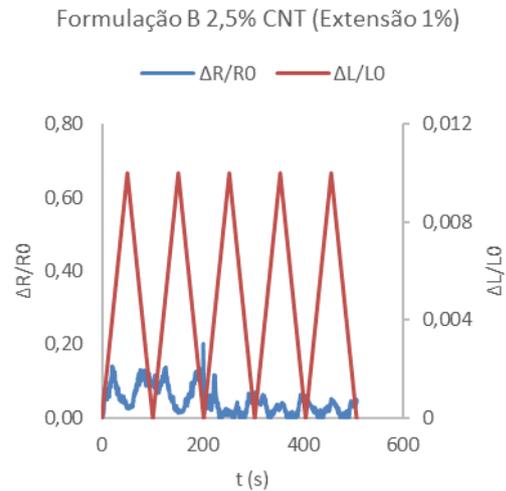


Figura 15: Comportamento piezoresistivo dos filamentos funcionalizados com a formulação B, 2,5% de CNTs e submetidas a tração cíclica com extensões de 1%

**Varões compósitos entrançados (BCRs).** Depois de incorporar filamentos impregnados com a Formulação B, adicionados com 1,5% a 2,5% de CNTs nos varões compósitos entrançados (BCR) de 50cm, de modo a otimizar-se a leitura do sinal elétrico, procedeu-se ao polimento e revestimento das extremidades dos BCRs com cola condutora. Este procedimento permitiu, posteriormente uma leitura mais eficaz do sinal elétrico nestes pontos durante os ensaios de piezoresistividade realizados aos varões funcionalizados, (Figura 16).



Figura 16: BCRs após colocação de cola condutora nas suas extremidades

O comportamento piezoresistivo dos varões compósitos foi avaliado através de ensaios de tração cíclica, consistindo em cinco ciclos com velocidade de extensão de 2mm por minuto, aplicando uma extensão de 0,5% e 1% ao comprimento dos BCRs entre amarras do dinamómetro (400mm) e ligando ambas as extremidades do varão às garras do multímetro utilizado para medição da resistência elétrica durante os ensaios [24].

Os gráficos relacionados com o comportamento piezoresistivo obtido a partir dos ensaios de piezoresistividade dos BCRs funcionalizados (Figura 17) apontam que, para o mesmo BCR, o seu comportamento é semelhante quando aplicados diferentes deformações, nota-se também que os picos têm mais amplitude e consistência para as concentrações de 2% e 2,5% de CNTs. Por outro lado, os BCRs com concentração de 1,5% de CNTs não mostram o mesmo comportamento piezoresistivo, desejado, devido à sua inconsistência na variação de resistência elétrica.

Os *gauge factors* apresentados nos gráficos prévios determinados atendendo ao terceiro ciclo de deformação, no intervalo da curva ascendente (Tabela 2). Os filamentos de fibra de vidro funcionalizados demonstram que, ao aumentar a percentagem de CNTs, o material perde a sua capacidade de sensorização devido ao princípio do limite de percolação, o mesmo ocorre aumentando a deformação do varão, o que pode estar a perturbar o sinal condutor obtido a partir da malha construída pelos CNTs. Ao serem obtidos resultados semelhantes com diferentes extensões, a elasticidade do PLA destaca-se, mantendo a integridade do filamento ao longo do seu comprimento. Os valores de *gauge factor* mostram ainda que, quanto maior for a concentração de CNTs, menor é a sensibilidade do material piezoresistivo. No entanto esta diferença é quase insignificante quando se comparam os gráficos associados à concentrações de 1,5% da CNTs aos referentes à concentração de 2% CNTs (Figura 17).

Tabela 2: Determinação de Gauge Factor dos BCRs funcionalizados testados

% CNTs (m/v)	Gauge Factor	
	Extensão 0,5%	Extensão 1%
1.50	0.61	0.59
2.00	0.58	0.44
2.50	0.48	0.28

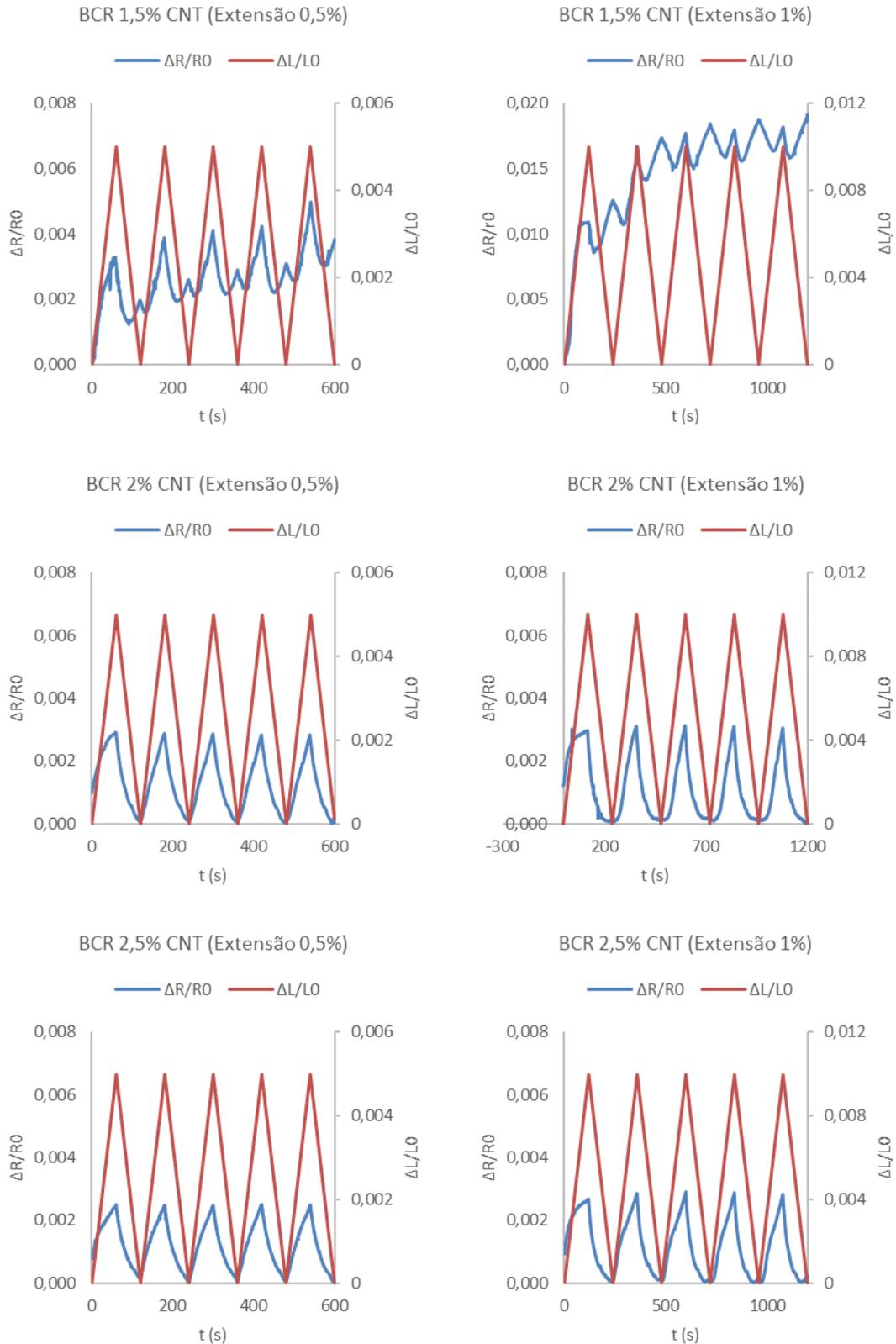


Figura 17: Comportamento piezoresistivo dos ensaios realizados às amostras de BCRs funcionalizadas com a formulação B, submetidas a tração cíclica, a extensões de 0,5 e 1%

## Conclusão

A combinação de sensores piezoresistivos e varões compósitos estruturais resulta num material de monitorização inteligente que pode resistir à abrasão e corrosão, enquanto facilita a sua instalação e manutenção. Para atingir estes objetivos, combinando a funcionalização dos CNTs com materiais

dúcteis através da impregnação num material bem conhecido e fiável, a fibra de vidro, o que resulta num material piezoresistivo capaz de monitorizar a variação da sua deformação através da variação de resistência elétrica. Neste caso, a formulação B, que combina o PLA com CNTs, quando implementada nos BCRs revelou resultados impressionantes, destacando-se a formulação B com concentração de 2% CNTs, a qual apresentou um comportamento consistente entre ciclos de tração e um *gauge factor* adequado.

Os ensaios piezoresistivos de filamento de fibra de vidro isolado demonstraram um melhor desempenho do que os atuais disponíveis no mercado, com uma diferença mais notória quando incorporados nos BCRs. No entanto, os ensaios piezoresistivos de tração cíclica iniciais para filamentos condutores isolados revelaram melhores resultados para as concentrações de 1,5% e 2% de CNTs. Dado o maior comprimento de medição elétrica e uma possível presença de materiais não condutores na sua periferia, os resultados melhores para os BCRs com filamento condutor incorporado, mudaram esta gama ideal para as concentrações de 2% e 2,5% de CNTs. A combinação dos BCRs com esta tecnologia satisfaz o propósito deste estudo, proporcionando uma abordagem multifuncional e inteligente ao mercado da engenharia estrutural.

## Referências

- [1] J. Saliba, A. Loukili, and F. Grondin, *Acoustic emission monitoring and quantitative evaluation of damage in concrete beams under creep*, in *Acoustic Emission (AE) and Related Non-destructive Evaluation (NDE) Techniques in the Fracture Mechanics of Concrete: Fundamentals and Applications*, Woodhead Publishing, (2015) 113–136.
- [2] A. Poursaeed, *Corrosion sensing for assessing and monitoring civil infrastructures*, in *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*, vol. 1, Woodhead Publishing, (2014) 357–382.
- [3] M. Motavalli, C. Czaderski, A. Schumacher, and D. Gsell, *Fibre reinforced polymer composite materials for building and construction*, in *Textiles, Polymers and Composites for Buildings*, Woodhead Publishing, (2010) 69–128.
- [4] A. Mufti, N. Banthia, B. Benmokrane, M. Boulfiza, and J. Newhook, *Durability of GFRP composite rods: Results from preliminary field tests don't match data from accelerated lab tests*, *Concr. Int.*, 2007.
- [5] R. S. Chen, Y. H. Muhammad, and S. Ahmad, *Physical, mechanical and environmental stress cracking characteristics of epoxy/glass fiber composites: Effect of matrix/fiber modification and fiber loading*, *Polym. Test.*, vol. 96, (2021) 107088.
- [6] S. T. Bashir, L. Yang, J. J. Liggat, and J. L. Thomason, *Kinetics of dissolution of glass fibre in hot alkaline solution*, *J. Mater. Sci.*, vol. 53, no. 3, (2018) 1710–1722.
- [7] M. Kimura, A. Ando, D. Maurya, and S. Priya, *Lead Zirconate Titanate-Based Piezoceramics*, in *Advanced Piezoelectric Materials*, Elsevier, (2017) 95–126.
- [8] R. Nayak, R. Padhye, and L. Arnold, *Melt-electrospinning of nanofibers*, in *Electrospun Nanofibers*, Elsevier Inc., (2017) 11–40.
- [9] R. Viter and I. Iatsunskyi, *Metal Oxide Nanostructures in Sensing*, in *Nanomaterials Design for Sensing Applications*, Elsevier, (2019) 41–91.
- [10] T. Kenny, W. Kester, and G. C. Low, *Strain Gages*, in *Sensor Technology Handbook*, Elsevier Inc., (2005) 501–529.
- [11] M.-H. Bao, *Chapter 5 - Piezoresistive sensing*, in *Handbook of Sensors and Actuators*, vol. 8, Elsevier, (2000) 199–239.
- [12] T. A. Saleh and V. K. Gupta, *Synthesis, Classification, and Properties of Nanomaterials*, in *Nanomaterial and Polymer Membranes*, Elsevier, (2016) 83–133.

- [13] P. Cassagnau, *Rheology of Carbon Nanoparticle Suspensions and Nanocomposites*, in *Rheology of Non-Spherical Particle Suspensions*, Elsevier Inc., (2015) 59–75.
- [14] A. M. Holban, A. M. Grumezescu, and E. Andronescu, *Inorganic nanoarchitectonics designed for drug delivery and anti-infective surfaces*, in *Surface Chemistry of Nanobiomaterials: Applications of Nanobiomaterials*, Elsevier Science Ltd., (2016) 301–327.
- [15] V. Harik, *Nanotechnology of Carbon Nanotubes*, in *Mechanics of Carbon Nanotubes*, Elsevier, (2018) 1–24.
- [16] J. Mack and R. Schledjewski, *Filament winding process in thermoplastics*, in *Manufacturing Techniques for Polymer Matrix Composites (PMCs)*, Elsevier, (2012) 182–208.
- [17] W. C. Smith, *Overview of textile coating and lamination*, in *Smart Textile Coatings and Laminates: A volume in Woodhead Publishing Series in Textiles*, Woodhead Publishing, (2010) 3–9.
- [18] W. Ouarhim, N. Zari, R. Bouhfid, and A. E. K. Qaiss, *Mechanical performance of natural fibers-based thermosetting composites*, in *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Elsevier, (2018) 43–60.
- [19] M. H. Zin, K. Abdan, and M. N. Norizan, *The effect of different fiber loading on flexural and thermal properties of banana/pineapple leaf (PALF)/glass hybrid composite*, in *Structural Health Monitoring of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites*, Elsevier, (2018) 1–17.
- [20] D. Panesar, R. Leung, M. Sain, and S. Panthapulakkal, *The effect of sodium hydroxide surface treatment on the tensile strength and elastic modulus of cellulose nanofiber*, in *Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites*, Woodhead Publishing, (2017) 17–26.
- [21] Sika, *Biresin ® CR141 1 / 3 Biresin ® CR141 Composite resin system for heat curing*. (2020) 1–3.
- [22] S. Patinha, F. Oliveira, F. Cunha, and C. Mota, *Desenvolvimento e Caracterização de Varões Compósitos Híbridos para Reforço de Betão*, 1–11.
- [23] Owens Corning, *SE 1200 Single End Roving for Knitting, Weaving, Filament Winding, and LFTP PRODUCT DESCRIPTION PRODUCT INFORMATION*. Brussels, (2012) 1–2.
- [24] X. Wang, J. Wang, S. Biswas, H. Kim, and I. Nam, *Characteristics of Epoxy-Based Composites Incorporating Hybridized Networks of Carbon or Graphite Nanoplatelets*, *Sensors*, (2020) 1–17.
- [25] A. M. Mhatre, S. Chappa, S. Ojha, and A. K. Pandey, *Functionalized glass fiber membrane for extraction of iodine species*, *Sep. Sci. Technol.*, vol. 54, no. 9, (2019) 1469–1477.
- [26] A. J. Bonon, M. Weck, E. A. Bonfante, and P. G. Coelho, *Physicochemical characterization of three fiber-reinforced epoxide-based composites for dental applications*, *Mater. Sci. Eng. C*, vol. 69, no. September, (2016) 905–913.
- [27] H. Sosiati, Y. A. Shofie, and A. W. Nugroho, *Tensile properties of Kenaf/E-glass reinforced hybrid polypropylene (PP) composites with different fiber loading*, *Evergreen*, vol. 5, no. 2, (2018) 1–5.
- [28] V. Fiore, G. Di Bella, and A. Valenza, *The effect of alkaline treatment on mechanical properties of kenaf fibers and their epoxy composites*, *Compos. Part B Eng.*, vol. 68, (2015) 14–21.

## **Análise de revestimentos de início do século XX - a Casa Barbot**

VELOSA Ana<sup>1,a</sup>, MALJAE Hamid<sup>2</sup>, VEIGA Rosário<sup>3</sup> e SILVA António Santos<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, RISCO, Portugal

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Portugal

<sup>3</sup>Departamento de Edifícios do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

<sup>4</sup>Departamento de Materiais do Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal

<sup>a</sup>avelosa@ua.pt

**Palavras-chave:** Cimento Natural; Edifícios Históricos; Século XIX e XX; Património Arquitetónico.

**Resumo.** O final do século XIX e o início do século XX pautaram-se por grandes mudanças em termos de utilização de materiais de construção. Os ligantes utilizados em argamassas e betões, sofreram grandes transformações, passando da cal aérea ao cimento Portland e passando pelo cimento natural. O cimento natural foi um ligante relevante utilizado em vários edifícios na Europa e em Portugal, desde a segunda metade do século XIX até ao início do século XX. No âmbito da conservação e reabilitação do edificado desta época, o conhecimento do ligante utilizado nos edifícios históricos ajudará os intervenientes na conservação dos elementos construídos a tomar a melhor decisão sobre o desenvolvimento de argamassas compatíveis para a intervenção. O presente trabalho estuda uma das casas que constituem o património de Vila Nova de Gaia, no Porto, conhecida como Casa Barbot, que foi construída por Bernardo Pinto Abrunhosa em 1904. Este trabalho visa determinar o(s) ligante(s) utilizado(s) na construção de grutas, arboreto e outros elementos no jardim deste edifício, utilizando várias técnicas analíticas. As amostras foram recolhidas das partes que caíram ou foram retiradas da estrutura. As amostras foram cuidadosamente inspecionadas em termos de deteção de diferentes camadas aplicadas e, em seguida, foram preparadas para os testes. Os resultados experimentais são apresentados em termos de composição química e mineralógica das amostras de argamassa utilizando diversas ferramentas analíticas, como FRX e DRX. A microestrutura do ligante hidratado e não hidratado, a porosidade e o tipo de agregados utilizados na argamassa, assim como a sua proporção na composição da argamassa foram estudados com recurso à análise petrográfica.

### **Introdução**

A arquitetura dos edifícios patrimoniais desde o início do final do século XIX e início do século XX vai desde a Arte Nouveau e a Arte Deco ao Modernismo. Este período caracteriza-se também pela transição do principal ligante utilizado em argamassas e betões da cal para o cimento. Em comparação com as argamassas antigas à base de cal [1-7], poucos estudos têm sido dedicados à caracterização de classificadores utilizados nos edifícios nos finais do século XIX e início do século XX [8-14].

A Casa Barbot (ver Figura 1), representativa do estilo Art Nouveau no Concelho de Vila Nova de Gaia, foi construída por Bernardo Pinto Abrunhosa em 1904, no local que hoje é considerada a principal artéria da cidade. O nome "Casa Barbot" foi dado quando a casa foi comprada por Ermelinda Vilano Barbot e sua família em 1944. O edifício tem todos os elementos como ferro forjado, vidro, azulejo combinado com cantaria, que caracterizam o estilo Art Nouveau em termos de materiais. O edifício também tem por um jardim de época típico, com estufas, um pequeno lago e grutas. Houve uma intervenção geral no jardim, que foi realizada em 1988. A Casa Barbot e o seu jardim constituem uma unidade que impacta o perfil histórico, arquitetónico e artístico que a obriga a ser preservada.

Este artigo visa determinar a caracterização das argamassas usadas na construção da Casa Barbot. Os testes de caracterização adotados neste estudo incluem ferramentas químicas e analíticas, como o XRF e o XRD, juntamente com a análise petrográfica que visa estudar o tipo de aglutinante, texturas e micro/macroestrutura de hidratos e aglutinante, a porosidade e o tipo de agregados utilizados na argamassa e a sua proporção na composição da argamassa.

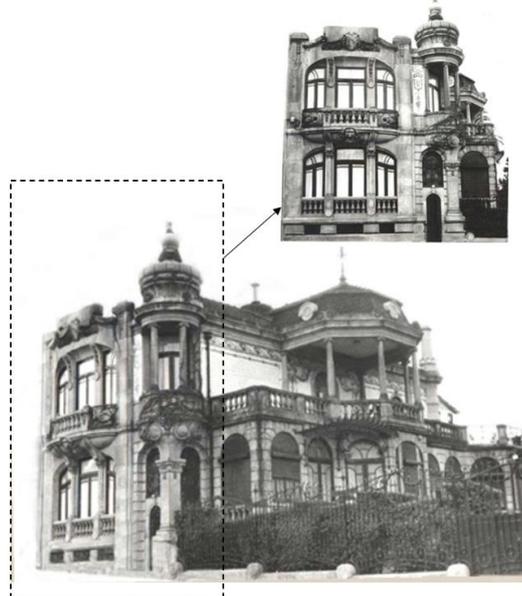


Figura 1: A fachada principal da Casa Barbot em Vila Nova de Gaia

### Amostragem e métodos

Foram recolhidas amostras da estrutura do jardim da Casa Barbot para caracterização composicional. As amostras incluíam as peças separadas e as retiradas das regiões fissuradas na estrutura da caverna e no miradouro no jardim de época desta casa. A Figura 2 mostra a localização de cada amostra retirada do jardim e da gruta. A descrição da localização das amostras juntamente com as suas nomenclaturas e defeitos observados são apresentadas na Tabela 1.



Figura 2: Localização das amostras de argamassa

Tabela 1: Descrição das amostras e das respetivas localizações

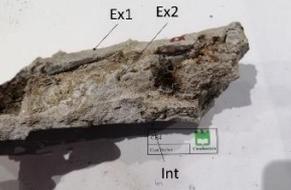
	Descrição	Imagem
CB1	Revestimento do teto da gruta no jardim	
CB2	Elemento fitomórfico na gruta	
CB3	Elemento fitomórfico na gruta	
CB4	Parte da conexão em forma de feixe no topo da gruta	
CB5	Elemento fitomórfico na gruta	
CB6	Parte da ligação no topo da gruta	
CB9	Um pedaço de teto de gruta com malha metálica	

Tabela 1: Descrição das amostras e das respectivas localizações (continuação)

CB10	?	
CB11	Balustrada do miradouro	

A metodologia de caracterização composicional compreende a difractometria de raios-X (DRX), a Fluorescência de Raios-X (FRX) e a microscopia ótica. Dependendo do tipo de ensaio, as amostras foram cuidadosamente extraídas de cada camada e preparadas.

A composição química das amostras foi determinada com FRX num espectrómetro PHILIPS XOPert PRO MPD. A composição mineralógica das amostras foi estudada com DRX. Os dados foram recolhidos utilizando o x'Pert-Pro MPD Philips/diffractometer panalytical equipado com radiação K ( $\lambda=1,5405 \text{ \AA}$ ) a funcionar a 40 mA e 45 kV. A digitalização foi realizada (2%,  $-\kappa$ ) entre 3° e 70° a uma velocidade de digitalização de 0,02 °/s, a partir da qual foram extraídas informações qualitativas.

A análise petrográfica foi adotada para a análise da microestrutura do ligante nos materiais amostrados e para identificar a sua composição. As lâminas delgadas foram analisadas usando microscopia luminosa transmitida. Secções finas e polidas das amostras foram preparadas com impregnação de vácuo com uma resina epoxy amarela e posteriormente observadas num microscópio polarizador Olympus BX60.

## Resultados

A composição química das amostras recolhidas das grutas e jardim da Casa Barbot é apresentada na Tabela 2. As argamassas estudadas são constituídas principalmente por óxido de cálcio (exceto CB1-Int), que varia entre 40,27% no CB6-Int e 76,99% em CB5-Ex. Um nível alto de CaO pode indicar a presença de cal como ligante da argamassa. O segundo componente principal em todas as amostras é a sílica que atinge um mínimo na camada externa de CB2 e CB5 (<10%). A argamassa aplicada na camada externa de CB2 e CB5 tem composição semelhante. Ambas as amostras foram retiradas da mesma região dentro da gruta, reforçando a hipótese de utilização da mesma argamassa nos elementos desta região. O teor mais elevado de enxofre (4,55%) e potássio (3,41%) em CB2-Ex pode ser devido a um ataque de sulfato ou à presença de gesso. Todas as amostras apresentam um elevado teor de óxido férrico ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) que pode resultar da corrosão das armaduras incorporadas.

Tabela 2: Composição química das amostras

	Mortars	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cl	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O
Camada externa	CB1-Ex	55.57	28.66	2.33	6.83	0.32	0.79	3.38	0.85	nd	0.74	0.036
	CB1-2-Ex	63.07	22.14	2.18	6.27	0.23	0.96	3.08	0.70	0.05	0.64	nd
	CB2-Ex	74.89	9.77	1.00	4.51	0.28	4.55	3.41	0.46	0.32	0.44	nd
	CB3-Ex2	75.76	13.05	1.29	5.46	0.26	0.76	1.68	0.51	0.03	0.58	nd
	CB3-Ex1	75.10	12.61	1.23	5.60	0.21	1.81	1.34	0.80	0.09	0.68	0.06
	CB4-Ex	66.32	18.44	1.45	8.83	0.20	1.45	1.83	0.54	0.12	0.44	0.03
	CB5-Ex	76.99	7.85	1.53	8.25	0.45	2.27	0.72	0.45	0.30	0.76	nd
	CB6-Ex	54.81	26.44	2.55	7.12	0.15	3.20	3.74	0.66	nd	0.72	nd
	CB10-Ex	67.13	18.03	1.47	8.10	0.18	0.18	1.45	0.53	0.09	0.66	nd
	CB11-Ex	57.58	28.60	1.98	6.30	0.17	0.99	2.35	0.79	0.08	0.76	nd
Camada interna	CB1-Int	8.730	58.76	8.09	8.90	0.17	0.14	12.30	1.67	nd	0.62	0.040
	CB2-Int	56.64	23.18	1.66	8.63	0.21	1.59	5.43	0.63	0.44	0.56	nd
	CB3-Int	65.04	21.25	1.84	5.95	0.22	0.58	3.16	0.71	nd	0.63	nd
	CB4-Int	62.05	22.53	1.73	7.72	0.19	0.57	3.01	0.60	0.03	0.51	0.03
	CB5-Int	68.80	16.48	1.89	6.21	0.14	1.53	2.76	0.55	0.19	0.59	0.033
	CB6-Int	40.27	36.64	5.35	7.35	0.12	0.59	6.94	1.45	0.03	0.73	nd
	CB9-Int	73.58	14.81	1.45	4.54	0.17	0.66	2.48	0.71	0.45	0.53	0.04
	CB10-Int	68.08	16.12	1.98	8.63	0.13	0.94	1.46	0.50	0.19	0.71	0.03
	CB11-Int	54.64	29.48	2.36	7.35	0.51	1.24	2.30	0.64	0.24	0.75	nd

As figuras 3 e 4 ilustram os difractogramas DRX das camadas externas, e internas das argamassas, respetivamente. Verifica-se a presença frequente de produtos como a belite (B), alite (A) e brownmillerite (Br) em todas as amostras, o que indica a utilização de cimento Portland como ligante, com exceção no CB2-Ex em que existe dúvida sobre a utilização de cal hidráulica ou cimento natural (romano). O hidróxido de cálcio ou portlandite só foi observado nas amostras CB4-Ex e CB11-Int, o que pode ser devido à presença de cal aérea como ligante ou ao cimento de Portland. A pasta cb10 e CB11 contêm etringite. Como se verifica, a presença de etringite coincide com a ausência de gesso, o que implica o consumo total de gesso na sua reação com o alumínio para a sua formação.

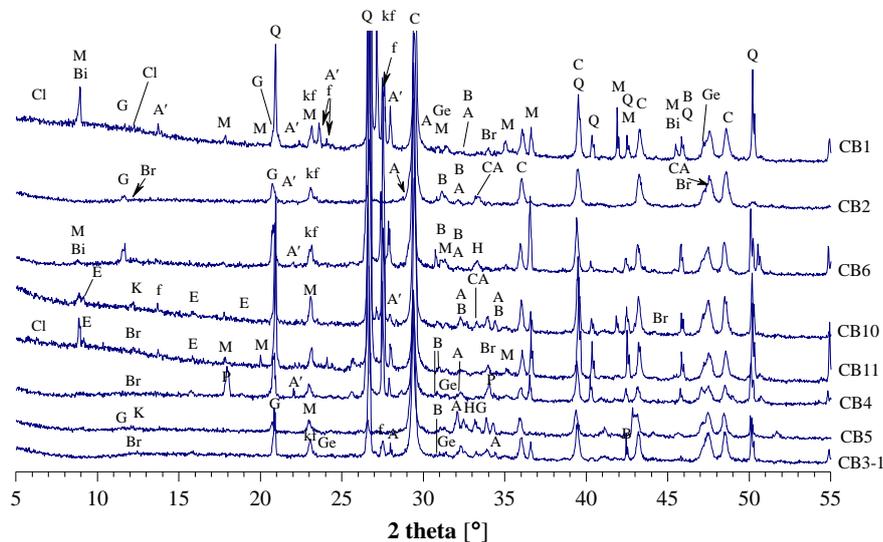


Figura 3: Difractogramas da camada externa de amostras de CB. (considera-se que os picos visíveis que não são rotulados com qualquer abreviatura têm o mesmo composto cristalino que as outras amostras no mesmo local)

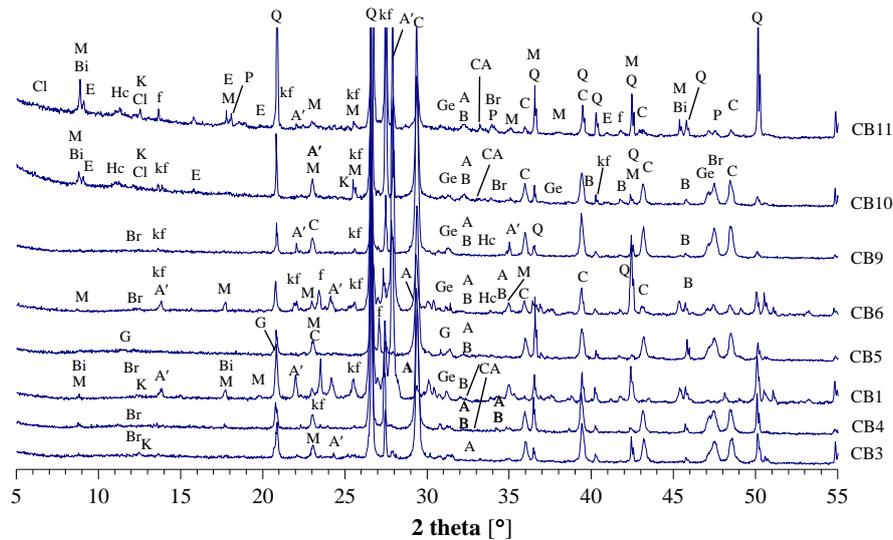


Figura 4: Difractogramas da camada interna de amostras de CB

A análise petrográfica por microscopia ótica foi realizada em três amostras de CB1, CB5 e CB11 representando o ligante e a composição das argamassas neste edifício. A análise mostrou uma variedade de agregados que também foram detetados por DRX. Todas as amostras estudadas mostram agregados constituídos principalmente por quartzo com uma pequena quantidade de mica e feldspato. Pequenas partículas semelhantes a carvão com fragmentos de 0,08 até 0,1 mm foram observadas na composição de todas as argamassas (Figura 6b). O ligante das argamassas é parcialmente carbonatado, o que foi confirmado pelos picos elevados de calcite nos difractogramas.

Uma razão para o teor relativamente elevado de óxido de ferro (FRX) é explicado pela análise petrográfica, que revela grãos tipicamente arredondados e grãos de cal microcristalina com alto teor de impurezas sob a forma de compostos de argila ricos em ferro acastanhado com uma transição para ferrite bem cristalina ( $C_4AF$ ). Os grãos acinzentados e sub-arredondados de minerais de clínquer parcialmente hidratados de  $C_4AF$  também foram vistos na composição do ligante de amostras de argamassa.

Uma mistura de diferentes materiais, incluindo cimento Portland, cal hidratada e escória de alto forno foram observados na pasta da camada interna de CB1 (CB1-Int), Figura 5b. A presença de escória de alto forno, rica em sílica e alumina, foi comprovada por FRX, onde o teor de sílica e alumina era o mais elevado entre todas as argamassas. CB1 (que pode ser vista por todo o teto da gruta) parece ser a mistura de cimento portland e cal com uma ocorrência frequente de grãos sub-angulares de cal microcristalina. Uma presença frequente de minerais de clínquer parcialmente hidratados sub angulares de alite ( $C_3S$ ), belite ( $C_2S$ ) e ferrite prova que o cimento de Portland foi o principal ligante das argamassas utilizadas na construção dos elementos da Casa Barbot. Os grãos de cimento Portland contêm fases de silicatos hidráulicos indiferenciados e fases semelhantes a vidros.

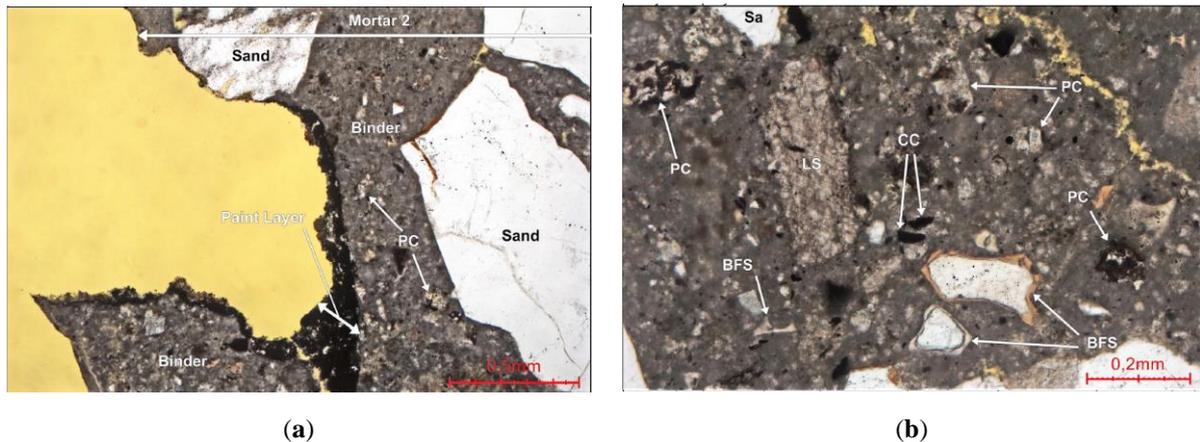


Figura 5: Micrografias sob luz polarizada transversal que mostram restos de cal e clínquer em CB1: (a) camada externa que mostra restos de uma camada de tinta preta na superfície da camada mais externa (Argamassa 2). O pigmento consiste em carbono. O ligante da argamassa é hidráulico com um alto teor de Cimento Portland (PC). b Camada interior cuja pasta consiste numa mistura de Cimento Portland PC, grãos de calcário betuminoso LS, escória alto forno BFS e cal hidratada não vista na foto. Pequenos fragmentos de carvão (CC) dão à argamassa uma cor bastante escura. Agregados de areia = Sa

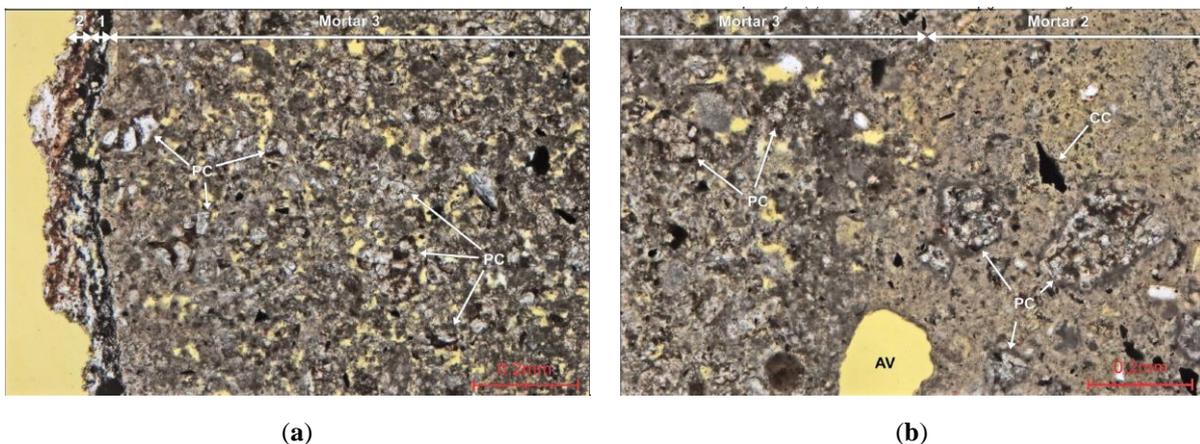


Figura 6: Micrografias sob luz polarizada transversal mostrando restos de cal e clínquer em CB5: (a) A argamassa é composta por Cimento Portland (PC) com uma pequena quantidade de cal hidratada. A camada de tinta mais interna (1) é de tinta preta à base de carbono. A camada de tinta mais externa (2) consiste em cal e pigmento ocre; b Contacto entre a camada de argamassa exterior 3 e a segunda camada de argamassa interior subjacentes argamassa 2. Em comparação com a Argamassa 3, a Argamassa 2 tem um teor relativamente elevado de cal hidratada. Poro de ar = AV. Partículas de carvão = CC

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Arquitecta Cristina Costa, arquitecta responsável da Casa Barbot, por toda a colaboração. Os autores pretendem ainda agradecer à Fundação Portuguesa para a Ciência e a Tecnologia (FCT) o apoio financeiro no âmbito do Projeto de Investigação CemRestore - Argamassas para a conservação de edifícios do início do século XX - Compatibilidade e Sustentabilidade - POCI-01-0145-FEDER-031612.

## Referências

- [1] R. Veiga, *Air lime mortars: What else do we need to know to apply them in conservation and rehabilitation interventions? A review*, Constr. Build. Mater. 157 (2017) 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.080>.
- [2] M. del M. Barbero-Barrera, L. Maldonado-Ramos, K. Van Balen, A. García-Santos, F.J. Neila-González, *Lime render layers: An overview of their properties*, J. Cult. Herit. 15 (2014) 326–330. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.07.004>.

- [3] M.R. Veiga, A.S. Silva, M. Tavares, A.R. Santos, N. Lampreia, *Characterization of Renders and Plasters from a 16th Century Portuguese Military Structure: Chronology and Durability*, Restor. Build. Monum. 19 (2014) 223–238. <https://doi.org/10.1515/rbm-2013-6603>.
- [4] M. Do Rosário Veiga, A. Fragata, A.L. Velosa, A.C. Magalhães, G. Margalha, *Lime-based mortars: Viability for use as substitution renders in historical buildings*, Int. J. Archit. Herit. 4 (2010) 177–195. <https://doi.org/10.1080/15583050902914678>.
- [5] O. Cazalla, R.-N. C. S. E, Cultrone G., *Effects on Traditional Lime Mortar Carbonation*, J. Am. Ceram. Soc. 76 (2002) 1070–1076.
- [6] M. Stefanidou, I. Papayianni, *The role of aggregates on the structure and properties of lime mortars*, Cem. Concr. Compos. 27 (2005) 914–919. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2005.05.001>.
- [7] P. Faria, F. Henriques, V. Rato, *Comparative evaluation of lime mortars for architectural conservation*, J. Cult. Herit. 9 (2008) 338–346. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2008.03.003>.
- [8] E. Cantisani, A. Falabella, F. Fratini, E. Pecchioni, S. Vettori, F. Antonelli, M. Giamello, M. Lezzerini, *Production of the Roman Cement in Italy: characterization of a raw material used in Tuscany between 19th and 20th century and its comparison with a commercialized French stone material*, Int. J. Archit. Herit. 12 (2018) 1038–1050. <https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1431730>.
- [9] J. Weber, N. Gadermayr, K. Bayer, D. Hughes, R. Kozłowski, M. Stillhammerova, D. Ullrich, R. Vyskocilova, *Roman cement mortars in Europe's architectural heritage of the 19th century*, in: ASTM Spec. Tech. Publ. (2008) 69–83. <https://doi.org/10.1520/stp45747s>.
- [10] F. Pintér, I. Vidovszky, J. Weber, K. Bayer, *Mineralogical and microstructural characteristics of historic Roman cement renders from Budapest, Hungary*, J. Cult. Herit. 15 (2014) 219–226. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2013.04.007>.
- [11] C. Gosselin, V. Verges-Belmin, A. Royer, G. Martinet, *Natural cement and monumental restoration*, Mater. Struct. Constr. 42 (2009) 749–763. <https://doi.org/10.1617/s11527-008-9421-7>.
- [12] J.J. Hughes, J. Válek, C.J.W.P. Groot, *How to Identify a Natural Cement: Case Study of the Vassy Chureh, France*, in: Hist. Mortars Adv. Res. Pract. Conserv., Springer (2019). [https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-91606-4\\_1](https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-91606-4_1).
- [13] L. Bratasz, R. Kozłowski, N. Mayr, D. Mucha, M. Stilhammerova, J. Weber, S. Chemistry, R. Technology, A.A. Vienna, *Roman Cement-Key historic material to cover the exteriors of buildings*, (2005) 2–11.
- [14] A. Klisińska-Kopacz, R. Tišlova, G. Adamski, R. Kozłowski, *Pore structure of historic and repair Roman cement mortars to establish their compatibility*, J. Cult. Herit. 11 (2010) 404–410. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2010.03.002>.

---

# CAPÍTULO 6

---

## SUSTENTABILIDADE NA CONSTRUÇÃO

## Sustainability assessment of buildings indicators

RODRIGUES L.<sup>1,2,3,a</sup>, DELGADO João M.P.Q.<sup>3,b</sup>, MENDES Adélio<sup>1,2,c</sup> e  
GUIMARÃES Ana S.<sup>3,d</sup>

<sup>1</sup> ALICE - Associate Laboratory in Chemical Engineering, Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

<sup>2</sup> LEPABE - Laboratory for Process Engineering, Environment, Biotechnology and Energy, Faculty of Engineering, University of Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465 Porto, Portugal

<sup>3</sup> CONSTRUCT, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n; 4200-465 Porto, Portugal

<sup>a</sup>up201306124@edu.fe.up.pt, <sup>b</sup>jdelgado@fe.up.pt, <sup>c</sup>mendes@fe.up.pt, <sup>d</sup>anasofia@fe.up.pt

**Keywords:** Sustainability, Sustainability indicators, Green Buildings, Rating Systems, Constructions.

**Abstract.** Sustainability can and must be applied to the building sector. As this sector is one of the main consumers of resources and energy, the industry has been undergoing transformations towards continuous improvement and optimization of the building construction process. In order to make a sustainability assessment of buildings, it is then necessary to make a survey of the parameters suitable for this analysis and organize them hierarchically. There are certification systems such as LEED, BREEAM, among others that allow for quantitatively assessing the building sustainability using parameters defined by these organizations. Authors have proposed sustainability indicators (SIs) and their respective weighting for determining the final score a building will receive [6-8]. Some of these indicators are subjective as there are no “universal” ways of quantifying them. The incorporation of this type of assessment in Building Information Modelling (BIM) software is quite interesting, thus offering a more complete tool for the idealization and construction of a building that can achieve the desired energy goals, ensuring a sustainable process in its elaboration. This work consists of a literature review of sustainability indicators. A comparison between the indicator proposals made by different authors will be carried out. Finally, a proposal of SI is done.

### Introduction

Sustainability is a very broad topic. In 1992 the United Nations declared sustainability as the guiding principle of the 21<sup>st</sup> century [1]. As technology improves, new ways of sustainable development are found and put to practice, making a paradigm shift in society. A good example of that is the adoption of renewable energy sources and the move away from fossil fuels. The three pillars of sustainability are Environmental, Social and Economic [2] – Figure 1.



Figure 1: The three pillars of sustainability

The topic of construction is also extensive. Being one of humanity's necessities, the construction sector is responsible for a significant amount of energy and material consumption [3]. Sustainability can be explored for different types of construction, such as structures [4]. However, this work is focused on the application and assessment of sustainability in buildings.

The building industry has been giving special attention to mitigating the environmental impact in their sector. A joint effort from different practitioners in the building field has been done to develop new strategies and methods with sustainability in mind. Akadiri *et al.* [3] propose three main objectives when developing a sustainable building: Resource conservation, Cost efficiency and Design for Human adaptation.

While a sustainability assessment system is primarily built on scientific data, the contextualization of national policies must also be considered. The development of these systems can help improve current policies, as these results inform governments on which measures to implement. As such, a close relationship must be maintained between science and political forces. Given the nature of their work, systems developed by scientists usually tend to undervalue the political dimension of indicators and give emphasis to knowledge creation. Gatekeeping also happens in the creation of these systems, since only the opinions of people that are "experts" in that field will be considered. For that, a new method of creating sustainability indicators must be done including both scientists and policymakers. Open communication with society and the use of voting to choose some parameters would also increase the credibility of these systems [5]. People that get involved in the creation and selection of SIs are usually the same people that will use them in their work. This makes them an active agent in talking with the responsible authorities to change procedures/make decisions with said indicators in mind [6].

## Sustainability indicators

Sustainability indicators can be either quantitative or qualitative. Quantitative indicators are built on variables that can be measured, such as the physical properties of a system. Qualitative indicators, on the other hand, are built on things that cannot be quantified and are usually subjective to the entity making the assessment. They can be represented as a positive or negative value compared to a benchmark. An example of a qualitative variable would be the level of happiness. Given the subjectivity of qualitative indicators, a preference for quantitative indicators is called.

We can divide the indicators into four different levels [7]:

- Indicator: Usually obtained as a measurement/process of primary data. An example of an indicator would be the monthly energy consumption of a piece of equipment.
- Aggregated Indicator: A combination of components that are defined by the same units. An example of an aggregated indicator would be the monthly energy consumption of an entire building.
- Composite Indicator: A combination of components that when tied together represent a complex concept into a single value. An example of a composite indicator would be the ecological footprint.
- Index: Usually a single number that encompasses all the data analysed for said assessment. An example of that would be the BREEAM rating.

Most sustainability assessment systems will have a final index value as a representation of sustainability. The following section will address different indicator lists and methods to determine the sustainability of buildings.

A thorough literature review was conducted to find the different indicators identified by different authors. The first disparity found is in their organisation. While some authors propose indicators under the three main pillars of sustainability, others divide them into different categories. For example, Ali *et al.* [8] used seven different categories for SIs. Water and Energy Efficiency are the most important categories out of the seven. These weightings were determined by a mixture of interviews and decision-making software. The coupling of this type of software with surveys with

professionals from the building industry is the approach used by most authors discussed in this work.

Other authors include a third level of hierarchy in the organisation of SIs. Yadegarideh *et al.* [9] surveyed both academics and industry workers. The authors proposed six different criteria, each with its sub-criteria. A total of 54 indicators were selected. The DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) method was applied to determine the importance level of each criterion and sub-criteria. The 3 levels of hierarchy can also be seen in Rahman *et al.* work [10]. The nomenclature is different from the previous one. While the three pillars of sustainability are kept as the three main objectives, the bottom layer is known as sub-criteria instead of indicators. After conducting a survey with 24 worldwide experts, and using fuzzy AHP (Analytic Hierarchy Process), weightings for all the criteria and sub-criteria were determined. The most important sub-criterion is “Design considerations towards safety” which is a social sub-criterion. Interestingly enough, the most important environmental sub-criterion is “Environmental design”, being the number 7 on the list and weighing less than half of the most important one [10].

Bragança *et al.* [11] kept the three-layer structure, going from categories, to indicators and finally parameters. The methodology developed used the same weight for all the parameters as a first approach. The authors proposed using studies from the US Environmental Protection Agency’s Science Advisory Board (SAB) as well as Harvard University as baselines for the environmental parameters and indicators.

Hassan *et al.* [12] also developed an integrated approach to assess the sustainability of buildings. A Technical category was added to the main three pillars of sustainability, making them the four main indicators of the study. The authors swapped the hierarchy order of indicators and criteria. This can lead to misunderstandings and confusion as different works use different names with different degrees of importance. Out of the 20 criteria proposed, 6 are subjective. A study case with three different buildings was then conducted using the proposed system and the final sustainable index of each building was calculated.

Heravi *et al.* [13] did a literature review on SIs and selected the ones they found relevant for industrial buildings. After the SIs collection, a survey was conducted on people from the petrochemical industry in Iran to understand the relevance of each indicator.

Another application of SIs in the building industry is found in the work of Stanitsas *et al.* [14]. A focus on identifying SIs for construction projects was given, namely under the scope of project management. After a thorough literature review, 127 potential indicators were identified, which then got validated and cut down to 82 via a survey with 6 construction management experts.

Another layer that makes model creation for sustainability assessment complex is the contextualization of where the project is being done. The regional climatic conditions affect the design of the building as well as their energy performance and longevity [15]. Agol *et al.* [16] have found that in developing countries SIs tend to be overlooked or misinterpreted, as the socio-economic panorama differs from the one in developed countries. A good sustainable assessment model should be flexible and able to adapt to the contextualization of the project [16]. Most of the sustainable rating tools have flexible weightings to adapt to different scenarios, as discussed further below.

**Building sustainability certification tools.** Parallel to academic research, government-owned/non-profit organizations started developing building certification processes. The first sustainability rating scheme was developed in the UK in 1990 and was called BREEAM (Building Research Establishment’s Environmental Assessment Method) [17]. France published HQE some years later and the USA followed with LEED in 1998. With the arrival of the new millennium, more certification systems were developed. In Portugal, the LiderA system was created in 2000 and more recently SBToolPT Urban, a branch of SBTool, was developed at U. Minho [18, 19].

The two best-known rating tools are BREEAM and LEED, and as such focus will be given to them. BREEAM has documentation for several types of buildings such as new constructions, infrastructures, in-use or refurbishment. LEED has different guidelines for building design + construction, residential, operations + maintenance, among others. The following discussion will

focus on the International New Construction Documentation by BREEAM and LEED's Building Design and Construction guide [20,21].

BREEAM International New Construction 2016 has 10 different environmental sections and assessment issues, as shown in Table 1.

Table 1: BREEAM International New Construction 2016 environmental sections and assessment issues (Adapted from [20])

Management	Health and wellbeing
Project brief and design Life cycle cost and service life planning Responsible construction practices Commissioning and handover Aftercare	Visual comfort Indoor air quality Safe containment in laboratories Thermal comfort Acoustic performance Accessibility Hazards Private space Water quality
Energy	Transport
Reduction of energy use and carbon emissions Energy monitoring External lighting Low carbon design Energy efficient cold storage Energy efficient transport systems Energy efficient laboratory systems Energy efficient equipment Drying space	Public transport accessibility Proximity to amenities Alternative modes of transport Maximum car parking capacity Travel plan
Water	Materials
Water consumption Water monitoring Water leak detection Water efficient equipment	Life cycle impacts Hard landscaping and boundary protection Responsible sourcing of materials Insulation Designing for durability and resilience Material efficiency
Waste	Land use and ecology
Construction waste management Recycled aggregates Operational waste Speculative floor and ceiling finishes Adaptation to climate change Functional adaptability	Site selection Ecological value of site and protection of ecological features Minimising impact on existing site ecology Enhancing site ecology Long term impact on biodiversity
Pollution	Innovation
Impact of refrigerants NO <sub>x</sub> emissions Surface water run-off Reduction of night time light pollution Reduction of noise pollution	Innovation

There are minimum standards that are established to ensure that performance against fundamental environmental issues is not overlooked. These are set for key areas such as Energy, Water, Waste, Management, Health and Wellbeing. Depending on the type of building, different sections will have different weightings. These can also vary depending on the building location. Adjustments are done depending on the Köppen-Geiger climate classification as well as the BREEAM precipitation zones.

Each section has several credits available. During the building assessment, a total of credits achieved will be determined, representing a percentage of credits achieved. This percentage is then multiplied by the section weighting, giving out a total section score (in %). Adding the 10 section scores will then give the final BREEAM score. The final score is then categorized into one of the final six BREEAM ratings, as shown in Table 2.

To achieve a given BREEAM rating, the minimum overall percentage score must be met as well as the minimum standards established for said rating.

LEED's v4.1 Building Design and Construction has some similarities to the system previously discussed. Instead of minimum standards, LEED has prerequisites and credits for the different sections. The distribution is shown in Table 3, where prerequisites start with an asterisk (\*).

Table 2: BREEAM rating benchmarks

BREEAM Rating	% score
Outstanding	≥ 85
Excellent	≥ 70
Very Good	≥ 55
Good	≥ 45
Pass	≥ 30
Unclassified	< 30

Table 3: LEED v4.1 Building Design + Construction Scorecard (Adapted from [21])

Indoor Environmental Quality	Location and Transportation	Sustainable Sites
*Minimum indoor air quality performance *Environmental tobacco smoke control *Minimum acoustic performance Enhanced indoor air quality strategies Low-emitting materials Construction indoor air quality management plan Indoor air quality assessment Thermal comfort Interior lighting Daylight Quality views Acoustic performance	LEED for neighbourhood development location Sensitive land protection High-priority site and equitable development Surrounding density and diverse uses Access to quality transit Bicycle facilities Reduced parking footprint Electric vehicles	*Construction activity pollution prevention *Environmental site assessment Site assessment Protect or restore habitat Open space Rainwater management Great island reduction Light pollution reduction Site master plan Tenant design and construction guidelines Places of respite Direct exterior access Joint use of facilities
Water Efficiency	Energy and Atmosphere	Materials and Resources
*Outdoor water use reduction *Indoor water use reduction *Building-level water metering Outdoor water use reduction Indoor water use reduction Optimize process water use Water metering	*Fundamental commissioning and verification *Minimum energy performance *Building-level energy metering *Fundamental refrigerant management Enhanced commissioning Optimize energy performance Advanced energy metering Grid harmonization Renewable energy Enhanced refrigerant management	*Storage and collection of recyclables construction and demolition *Waste management planning *PBT source reduction - Mercury Building life-cycle impact reduction Building product disclosure and optimization - EDP Building product disclosure and optimization - Sourcing of raw materials Building product disclosure and optimization - Material ingredients PBT source reduction - Mercury PBT source reduction - Lead, cadmium, and copper Furniture and medical furnishings Design for flexibility Construction and demolition waste management
Integrative Process	Innovation	Regional Priority
*Integrative project planning and design Integrative Process	Innovation LEED accredited professional	Regional priority

Unlike BREEAM, not all prerequisites and credits are assessed for all the different types of buildings. The full scorecard shows which ones need to be assessed and how many points they confer. LEED scores go up to 110 possible points. The project also needs to meet the three LEED Minimum Program Requirements:

- The project must be in a permanent location on existing land
- The project must use reasonable LEED boundaries
- The project must comply with project size requirements

A minimum of 40 points are required for certification. The four levels of certifications are displayed in Table 4.

Table 4: LEED certification levels

LEED Certification	Total points
Platinum	80+
Gold	60-79
Silver	50-59
Certified	40-49

Different sustainability assessment tools have different terms of categories. While BREEAM and LEED have some in common like “Energy”, “Water” and “Materials”, there are certain categories that are only found in some of them (for example, LEED has the “Sustainable Sites” category). Zulkefli *et al.* [22] compared the indicators of different rating tools and organized them into the primary themes of sustainability (Environment, Social and Economic Indicators. A total of 87 indicators were proposed to assess green building sustainability. No weighting was reported for them, which can be seen as a step back from the aforementioned rating tools.

In 2015, the European Commission started developing a common European approach to assess the environmental performance of buildings. The product is known as Level(s) and is still ongoing, with indicators still being reviewed and updated with user feedback [23].

Level(s) is a framework that has core indicators of sustainability for buildings. It is developed with 6 macro-objectives in mind, as shown in Table 5 **Error! Reference source not found.**

Table 5: Level(s) macro-objectives and their definition (Adapted from [23])

Level(s) macro-objectives	Definition
1- Greenhouse gas and air pollutant emissions along a building life cycle	Minimise the total greenhouse gas emissions along a buildings life cycle <sup>1</sup> , from cradle to grave, with a focus on emissions from building operational energy use and embodied energy.
2- Resource efficient and circular material life cycles	Optimise the building design, engineering and form in order to support lean and circular flows, extend long-term material utility and reduce significant environmental impacts.
3- Efficient use of water resources	Make efficient use of water resources, particularly in areas of identified long-term or projected water stress.
4- Healthy and comfortable spaces	Create buildings that are comfortable, attractive and productive to live and work in, and which protect human health.
5- Adaptation and resilience to climate change	Futureproof building performance against projected future changes in the climate, in order to protect occupier health and comfort and to minimise long-term risks to property values and investments.
6- Optimised lifecycle cost and value	Optimise the life cycle cost and value of buildings to reflect the potential for long- term performance improvement, inclusive of acquisition, operation, maintenance, refurbishment, disposal and end of life.

Out of the 16 core indicators presented in Table 6 **Error! Not a valid bookmark self-reference.**, 3 of them are composite indicators (Life cycle Global Warming Potential, Construction & demolition waste and materials and Indoor air quality), 5 of them are qualitative (Lighting and visual comfort, Acoustics and protection against noise, Increased risk of extreme weather events, Increased risk of flood events and Value creation and risk exposure) and 1 (Bill of quantities, materials and lifespans) is reported as information reporting.

Level(s) framework is divided into three levels. The first level regards the conceptual design for the building project. It is the simplest level, in which early-stage qualitative assessments are applied to the conceptual design or concepts of the building. The second level covers the detailed design and construction performance of the building. This intermediate level entails quantitative assessments of the designed performance and monitoring of the building. The third and final level encompasses the as-built and in-use performance of the building after completion. It is the most advanced level and it entails the monitoring and surveying of activity on the construction site and the building, as well as its occupants. The higher the level, the more accurate and reliable the report will be, but the framework is built so that one can choose which level/combination of levels to work at [24].

Table 6: Level(s) macro-objectives and their corresponding indicators (Adapted from [23])

Greenhouse gas and air pollutant emissions along a building's life cycle	Use stage energy performance
	Life cycle Global Warming Potential
Resource efficient and circular material life cycles	Bill of quantities, materials and lifespans
	Construction & demolition waste and materials
	Design for adaptability and renovation
	Design for deconstruction, reuse and recycling
Efficient use of water resources	Use stage water consumption
Healthy and comfortable spaces	Indoor air quality
	Time outside of thermal comfort range
	Lighting and visual comfort
	Acoustics and protection against noise
Adaptation and resilience to climate change	Protection of occupier health and thermal comfort
	Increased risk of extreme weather events
	Increased risk of flood events
Optimised life cycle cost and value	Life cycle costs
	Value creation and risk exposure

Finally, Level(s) has four briefings on the key concepts of the framework. They are as follows:

- Whole life cycle and circular thinking;
- Closing the gap between design and actual building performance;
- How to achieve a sustainable renovation;
- How sustainability can have a positive influence on the market value of a property.

As technology progresses the concept of smart buildings has become a reality. These buildings are equipped with sensors that allow the monitoring of several parameters. The empirical data obtained can be used in systems that will automatically control parameters like temperature, reducing the cost of energy consumption by toggling them only when necessary. It is important that the system should take into account the personal preferences of the people using the space, so a survey should be conducted periodically and use those results to improve the model predictions [25].

**Compilation of sustainability indicators.** After a thorough literature review, sustainability indicators proposed by the authors were compiled into a single list. A cross-reference check between all the lists was performed to understand which indicators are proposed by multiple authors, and depending on the number of occurrences, the more important the indicator is deemed to be. The three pillars of sustainability were chosen as the final list is shown in Table 7.

Table 7: Compilation of sustainability indicators found through the conducted literature review. The darker the color, more the indicator was mentioned

Environment	Social	Economic
Renewable energy	Design considerations towards safety	Innovation management/new product development
Thermal comfort	Acoustic and noise control	Use of regional resources
Site selection	Public transportation access & transportation plan	Cost of construction
Recycled/reused materials	Thermal comfort	Cost of operation and maintenance
Indoor air quality performance	Daylight	Regional workers and personnel
Climate Change	Visual quality	Supply and demand sides
Noise Pollution	Employment (social aspects)	Marketing price
Energy Efficiency	Infrastructure improvement	Return on Investment
Indoor air quality	Community relationships and involvement	Durability of building
Visual comfort	Public acceptance towards the project	Direct job opportunities
Climate change adaptation/disaster risk management	Stakeholder engagement/management	Indirect job opportunities
Recycled water	Sustainable development supported by local laws	Economic and Political stability
Destruction of the stratospheric ozone layer	Public Comfort	Effects on national economy
Efficient lighting	Cultural heritage	Use of national resources
Sensitive land protection	Natural heritage	Enhancement in capacity of infrastructure
Public health and safety	Workers and personnel comfort	Effects on trade balance (national/regional)
Workers and personnel's health and safety	Post-occupancy user satisfaction survey (to assess end-user's comfort)	Financing (loan interests)
Loss of habitats, agricultural farms and trees	Migration effects	Opportunity-cost
Construction water quality impact	Social responsibility	Cost of equipment and their installation
Considering the life cycle of products and services to reduce environmental impacts	Social action funding/Concepts of social justice	Distributed income innovation and technological advance
Project biodiversity	Corporate sustainability and organizational culture	Stakeholder involvement/participation
Environmental impact assessment project report	Labor practices	Target marketing and benefits
Environmental tobacco smoke (ETS) control	Needs assessment of society/people	Effective Project Control
Carbon dioxide monitoring and control	Human rights	Best practice strategy
Minimum IAQ performance	Employee commitment/commitment in the workplace	Customer-relationship management/Access to a range of customers
Envelope Insulation	Project independence of political factors	Scope control through managing changes
Use of environmentally friendly refrigerants and cleaning materials, effective and low-carbon cleaning equipment and machineries	Social impact reports	Business ethics
Renewable raw materials	Transparent and competitive procurement processes	Facility management Technologies/general improvements
Hazardous degradable wastes	Absence of bureaucracy from the workplace	Supply Chain collaboration
Hazardous non-degradable wastes	Contractor – supplier relationship	Effective strategic planning

Table 7: Compilation of sustainability indicators found through the conducted literature review. The darker the color, more the indicator was mentioned (continuation)

Environmental management systems/policy implications	Commitment to the stakeholders' needs	Organizational culture
Flood risk assessment strategy to prevent flooding	Well-defined project scope and project limitations	Project outputs emphasis
Air Pollution	Holistic view of benefits	Ability to pay and affordability
Violation of animal's territory	Product – service systems	Environmental/economics accounting
Durable materials	Emphasis on high quality workmanship	Developing an efficient risk management plan by the PMT
Non-renewable energy	Encourage competition	Implementing an effective change management strategy
Reuse of process water	Implementing a quality management system	Efficient data processing for decision-making practices
Non-hazardous recyclable wastes	First mover advantage	Bureaucratic streamlining
Non-hazardous non-recyclable wastes	Culture of accountability	Internationalization
Environmental management plan for impacts by the Project Management Team (PMT)	Comprehensive contract documentation	Cargo delivery route & proximity
Sustainable project delivery through project stakeholder management	Diversification	Expenditure on R&D
Environmental education and training	Competitive tendering/comprehensive pre-tender investigation on project	Lifecycle costs
Eco-efficiency	Adaptability in project environment	Reserve funds
Consistent and predictable load	Intangible asset management	
Up to date environmental construction technologies and methods	Multidisciplinary/competent Project Management Team (PMT)	
Environmental responsibility/justice	The role of trust within the PMT	
Identify and address choke points	Following project management phases/processes	
Appropriate and flexible environmental design details and specifications	Project manager's leadership style	
Mold Prevention	Employing of operational decision-making techniques by the PMT	
Sustainable maintenance	Project monitoring and evaluation by the PMT, though previous experiences in projects	
Acidification potential	Managing knowledge and awareness to promote sustainable project delivery (PMT)	
Establish environmental policy and end-user guide and manual	Management considerations towards safety	
Low carbon design	Affordability	
Grid harmonization	Neighbourhood accessibility and amenities	
	Maximum car parking capacity	
	Places of respite	

As shown in Table 7, a total of 153 indicators were found. The Social pillar has the highest number out of the three, with 56 indicators. It is followed by the Environmental pillar with 54 indicators and lastly the Economic pillar with 43. The most prevalent indicators in the Environment pillar are “Renewable energy”, “Thermal comfort” and “Site selection”. In the Social Pillar we have “Design considerations towards safety” and “Acoustic and noise control”. Finally, in the Economic Pillar the most mentioned indicator was “Innovation management/new product development”.

## Discussion

Sustainable indicators were compiled after a thorough literature review. One of the hurdles in comparing information available is the difference in the nomenclature used by different authors. For example, the order of hierarchy, in Hassan *et al.* [12] work, puts indicators above criteria, while Rahman *et al.* [10] go with criteria at the top, followed by sub-criteria, and finally indicators at the bottom. A convention for naming the different levels of importance would help compare sustainability assessment proposals. While some authors keep the sustainability indicators (SIs) under the three main pillars of sustainability, others prefer to divide them into several categories.

Some SIs are subjective, especially in the social field, which makes it complicated to make a bias-free analysis of building sustainability. Adding to that, most of the validation of indicators and respective weights is done in small groups of experts closely located to the authors. This can influence the tendency of the weightings obtained. An idea to make a robust and trustable sustainability assessment tool is to conduct a worldwide survey. On the other hand, the assessment should be flexible and take into consideration the context and the location of the project, making it hard to make a "fits all" formula.

Several sustainable assessment rating systems were developed that have flexible parameters depending on the project analysed. LEED and BREEAM are the most popular among these and have been used in building certification for more than two decades now. These rating systems keep being revised as time progresses, making them solid choices as building sustainability assessment tools.

The implementation of sensors in smart buildings is a promising way of being able to further developing these models. Having empirical data coupled with personal opinions from residents can help improve the living conditions in said buildings.

## Conclusions

In the context of today's world, buildings sustainability is and will be an unavoidable pillar for the construction industry. There has been a concern to create tools for sustainability assessment and continuous improvement applied to buildings. However, it is a very complex system and this type of analysis can be very extensive and detailed, complicating its ease of use.

The consensus seems to be to divide sustainability into 3 major parameters: : Environmental, Social and Economic. For each of these categories, several sustainability indicators can be identified. However, a consensus on the number of categories, indicators, and respective weighting has not been achieved. As building's location is important, parameters may have different weights in different locations around the world. The most commonly used certification schemes like BREEAM and LEED consider this.

While a truly global sustainability assessment tool has not been found, some of the author's proposals in literature are solid baselines and have the potential to be further developed into such a system. Certification schemes are also very good alternatives, as they are reviewed frequently. Smart buildings can also play an important role in active sustainability assessment, as empirical data can be obtained and used in the continuous improvement of building sustainability.

## Acknowledgments

This work is a result of the project "BlueWoodenHouse", with the reference POCI-01-0247-FEDER-047157, co-funded by the European Regional Development Fund (ERDF) through the Operational Programme for Competitiveness and Internationalization (COMPETE 2020), under the Portugal 2020 Partnership Agreement. In addition, this work was financially supported by LA/P/0045/2020 (ALiCE), Base Funding - UIDB/04708/2020 and UIDB/00511/2020, Programmatic Funding - UIDP/04708/2020 (CONSTRUCT) and UIDP/00511/2020 (LEPABE), funded by national funds through the FCT/MCTES (PIDDAC); and by FCT – Fundação para a

## References

- [1] W. Klöpffer, B. Grahl, *Life Cycle Assessment (LCA): A guide to best practice*. Wiley, 2014.
- [2] B. Purvis, Y. Mao, D. Robinson, *Three pillars of sustainability: in search of conceptual origins*, Sustainability Science, 14 (2019) 681-695.
- [3] P.O. Akadiri, E.A. Chinyio, P.O. Olomolaiye, *Design of a sustainable building: a conceptual framework for implementing sustainability in the building sector*, Buildings, 2 (2012) 126-152.
- [4] D. Gijzel, D., M. Bosch-Rekveltdt, D. Schraven, M. Hertogh, *Integrating sustainability into major infrastructure projects: four perspectives on sustainable tunnel development*, Sustainability, 12 (2020) 6.
- [5] E. Rametsteiner, H. Pülzl, J.A. Olsson, P. Frederiksen, *Sustainability indicator development—Science or political negotiation?*, Ecological Indicators, 11 (2011) 61-70.
- [6] S. Moreno-Pires, T. Fidélis, *A proposal to explore the role of sustainability indicators in local governance contexts: The case of Palmela, Portugal*, Ecological Indicators, 23 (2012) 608-615.
- [7] T. Hák, B. Moldan, A.L. Dahl, *Sustainability Indicators: A Scientific Assessment*, Island Press, 2012
- [8] H.H. Ali, S.F. Al Nsairat, *Developing a green building assessment tool for developing countries – Case of Jordan*, Building and Environment, 45 (2009) 1053-1064.
- [9] E. Yadegaridehkordi, et al., *Assessment of sustainability indicators for green building manufacturing using fuzzy multi-criteria decision making approach*, Journal of Cleaner Production, 277 (2020) 122905.
- [10] H.A. Rahman, M. Ebrahimi, C. Wang, L.C. Wood, *Integrating and ranking sustainability criteria for housing*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability, 169 (2016) 3-30.
- [11] L. Bragança, R. Mateus, H. Koukkari, *Building sustainability assessment*, Sustainability, 2 (2010) 2010-2023.
- [12] O.A.B. Hassan, *An integrated approach to assessing the sustainability of buildings*, Journal of Engineering, Design and Technology, 14 (2016) 835-850.
- [13] G. Heravi, M. Fathi, S. Faeghi, *Evaluation of sustainability indicators of industrial buildings focused on petrochemical projects*, Journal of Cleaner Production, 109 (2015) 92-107.
- [14] M. Stanitsas, K. Kirytopoulos, V. Leopoulos, *Integrating sustainability indicators into project management: The case of construction industry*, Journal of Cleaner Production, 279 (2021) 123774.
- [15] J. Kono, Y. Ostermeyer, H. Wallbaum, *Investigation of regional conditions and sustainability indicators for sustainable product development of building materials*, Journal of Cleaner Production, 196 (2018) 1356-1364.
- [16] D. Agol, A.E. Latawiec, B.B.N. Strassburg, *Evaluating impacts of development and conservation projects using sustainability indicators: Opportunities and challenges*, Environmental Impact Assessment Review, 48 (2014) 1-9.
- [17] R. Reed, A. Bilos, S.J. Wilkinson, K.W. Shultze, *International comparison of sustainable rating tools*, Journal of Sustainable Real Estate, 1 (2009) 1-22.

- [18] LiderA, *LiderA - Sistema de avaliação da sustentabilidade*. [Acedido a 27-12-2021]; Available from: <http://www.lidera.info/?p=faqs&RegionId=6>.
- [19] L. Bragança, *SBTOOL URBAN: Instrumento para a promoção da sustentabilidade urbana*, in *Simpósio Nacional de Gestão e Engenharia Urbana - SINGEURB 2017*. Universidade Federal de São Carlos, Brazil, 2017.
- [20] B. Global, *BREEAM International new construction 2016*. 2.0 ed, ed. BREEAM, 2016.
- [21] Council, U.S.G.B., *LEED v4.1 - Building Design And Construction*, ed. W.D.C.U.S.G.B. Council. 2021.
- [22] F.M. Rahim, N.S. Zulkefli, N. Zainon, *Preliminary review of sustainability indicators to greening existing building based on LCSA components*,. *Malaysian Construction Research Journal*, 9 (2020) 81-93
- [23] N. Dodd, M. Cordella, M. Traverso, S. Donatello, *Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings, User Manual 1: Introduction to the Level(s) common framework (Publication version 1.1)*. 2021.
- [24] N. Dodd, M. Cordella, M. Traverso, S. Donatello, *Level(s) – A common EU framework of core sustainability indicators for office and residential buildings, User manual 2: Setting up a project to use the Level(s) common framework (Publication version 1.1)*. 2021.
- [25] Y.F. Si, J.Q. Yu, B. Dang, J.H. Huang., *The use of wireless systems and assessment models for the sustainability of intelligent buildings*, *Advanced Materials Research*, 953-954 (2014) 1663-1667.

## Hidratação e desenvolvimento de fase do cimento reciclado termoativado

BOGAS José Alexandre<sup>1</sup>, REAL Sofia<sup>1</sup>, CARRIÇO<sup>1,a</sup>, ABRANTES J.C.C.<sup>2</sup>,  
GUEDES Mafalda<sup>3</sup>

<sup>1</sup>CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais, 1, 1049-001, Lisboa, Portugal

<sup>2</sup>CICECO, Aveiro Materials Institute, Universidade de Aveiro, 3810-193, Aveiro, Portugal

<sup>3</sup>CeFEMA, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal

<sup>a</sup>ana.carrico@tecnico.ulisboa.pt

**Palavras-chave:** Cimento Reciclado, Reidratação, Ligante Eco-eficiente, Calorimetria, Análise de Rietveld.

**Resumo.** Neste artigo foi analisada a reidratação do cimento reciclado, um novo ligante eco-eficiente obtido a partir da ativação térmica de resíduos de materiais cimentícios. O desenvolvimento das fases foi acompanhado entre as 8 horas e os 28 dias em pastas produzidas com cimento reciclado (CR) e comparado com o observado em pastas de cimento Portland (CP) de igual composição. A caracterização foi realizada por calorimetria isotérmica, termogravimetria e difração de raios-X com análise de Rietveld. A taxa de hidratação mais significativa do CR ocorreu após 24 horas; as curvas calorimétricas revelaram um período de indução mais longo do que o observado em pastas de CP e um pico de aceleração apenas após 30 horas de hidratação. A análise termogravimétrica revelou que foram desenvolvidas fases AFm na pasta de CR nas primeiras 8 horas. O polimorfo  $\alpha'$ -H-C<sub>2</sub>S foi identificado por difração de raios-X como a principal fase anidra do cimento reciclado. A análise de Rietveld apontou para uma taxa de reação deste polimorfo mais relevante entre as 24 horas e os 3 dias, sendo semelhante à do C<sub>3</sub>S na pasta de CP aos 28 dias. O menor teor da fase menos reativa de  $\beta$ -C<sub>2</sub>S na pasta de CR do que na pasta de CP, conduziu a um grau de hidratação ligeiramente superior da primeira aos 28 dias. No entanto, o volume total de produtos hidratados a longo prazo foi menor na pasta de cimento reciclado.

### Introdução

O cimento reciclado (CR) é um novo ligante de baixo teor em carbono, baseado na ativação térmica de resíduos cimentícios a baixa temperatura, em torno dos 600-700 °C [1, 2], evitando a descarbonatação verificada na produção de cimento Portland (CP). Uma revisão abrangente dos últimos desenvolvimentos no domínio de materiais cimentícios com CR é apresentada em Carriço et al. [1]. Em geral, o CR é caracterizado por uma elevada área superficial e estrutura porosa responsáveis pela sua reatividade rápida e elevada exigência de água [1, 3, 4].

O conhecimento sobre a composição e caracterização das fases de CR ainda é escasso, nomeadamente no que diz respeito à evolução da hidratação e desenvolvimento de fases ao longo do tempo. O presente trabalho pretende caracterizar a reidratação e desenvolvimento de fases de pastas de cimento reciclado termoativadas a partir das primeiras horas de hidratação. Para tal, foi realizado um extenso trabalho experimental, onde a reidratação do CR foi analisada por meio de calorimetria isotérmica, termogravimetria e análise de DRX e com refinamento de Rietveld, juntamente com testes de resistência mecânica. Os testes foram realizados em pastas entre as 8 horas e os 28 dias de hidratação, comparando pastas CR e pastas de CP de igual composição.

## Campanha experimental

**Materiais e composições.** Neste estudo, utilizou-se um CEM I 42.5R (CP) para produzir a pasta de origem (PO) que serviu como material precursor do cimento reciclado. A PO foi produzida com uma relação água/cimento (a/c) de 0,55, tendo atingido uma resistência média à compressão aos 28 dias de cerca de 41 MPa. As pastas foram moldadas em cubos de 150 mm e curados em água até aos 7 dias de idade. Posteriormente, foram mantidos em ambiente de laboratório por mais de 3 meses. Em seguida, os cubos foram submetidos a diversas etapas de britagem e moagem a fim de reduzir o tamanho médio das partículas de CR. Os cubos foram primeiro reduzidos a partículas de cerca de 7 cm por meio de duas britadeiras de maxilas com diferentes aberturas, seguidos por moagem de rolos para obter partículas abaixo de 2 mm. As partículas obtidas foram posteriormente moídas num moinho de bolas horizontal durante 2 horas. Finalmente, os resíduos foram peneirados a 250 µm, e um cimento reciclado não termoativado (NT) foi obtido.

O processo de ativação térmica foi realizado num forno rotativo tubular da Thermolab Scientific Equipments. As partículas de NT foram aquecidas a 10°C/min, até 700°C, com um período de residência de 3 horas na temperatura máxima de tratamento, e então arrefecidas dentro do forno até temperatura ambiente. A curva de ativação térmica e a temperatura máxima de tratamento foram definidas com base em trabalhos anteriores dos autores [2, 5]. O cimento reciclado termoativado (CR) foi armazenado em recipientes selados até à sua utilização. As principais propriedades físicas e químicas do CR foram também caracterizadas em trabalhos anteriores dos autores [2, 6] e estão indicadas na Tabela 1. A densidade absoluta do CR foi determinada por picnometria de hélio (Multi, Quanta Chrome) e é semelhante à do CP. As partículas de CR apresentaram uma estrutura porosa, superfície rugosa e elevada área superficial.

Tabela 1: Propriedades do CEM 42,5R (CP) e do cimento reciclado (CR)

Parâmetro	Norma	CP	CR
Massa volúmica (g/cm <sup>3</sup> )		3,07 <sup>(a)</sup>	3,08 <sup>(b)</sup>
Área superficial BET (cm <sup>2</sup> /g)		18134	156853
Resistência à compressão de argamassa de referência (MPa)	NP EN 196-1	28,8 (2 dias) 57,0 (28 dias)	-
Resíduo insolúvel (%)		0,89	<0,52
SiO <sub>2</sub> + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	NP EN 196-2	19,64 + 5,34 + 3,05	19,14 + 5,13 + 3,00
CaO + MgO (%)	NP EN 196-2	62,80 + 1,80	60,79 + 1,77
Free CaO (%)	NP EN 451-1	0,70	13,94
Exigência de água (w/b)	NP EN 196-3	0,31	0,72
Tempo de presa (min)	início	170	315
	fim	280	417

<sup>(a)</sup> LNEC E 64 <sup>(b)</sup> Picnometria de hélio

A exigência de água do CR foi mais de duas vezes superior à do PC (Tabela 1). Como mencionado, isto deve ser atribuído ao aumento da área superficial e rápida reidratação das fases desidratadas, à extinção do CaO livre e à absorção de água do CR, bem como à aglomeração das partículas de CR [7–10]. O tempo de presa do CR foi cerca de 1,9 vezes mais longo que o do PC (Tabela 1), corroborando os resultados obtidos em estudos anteriores [2, 5, 11]. De facto, observou-se uma hidratação precoce no CR, o que pode ter contribuído para a sua presa mais tardia. Além disso, a maior dimensão das partículas do CR também pode ter conduzido a estes resultados.

Foi produzida uma pasta (PCR) usando 100% do CR previamente termoativado e uma relação água/ligante (a/l) (0,72) que garantia consistência normal, conforme a NP EN 196-3 [12]. Para fins de comparação, também foi produzida uma pasta de referência com CP (PCP) com a mesma composição (a/l=0,72) mais fluida devido à menor exigência de água do CP (Tabela 1).

**Ensaio.** Os cimentos anidros CP e CR e as suas respectivas pastas PCP e PCR foram caracterizados por calorimetria isotérmica (CI), termogravimetria (TG) e difração de raios-X (DRX), quanto à fluidez e resistência à compressão e flexão. Para cada composição, quinze provetes prismáticos de 160x40x40 mm foram produzidos para ensaios mecânicos e três para análise morfológica. Após a produção, todos os provetes foram colocados em câmara climática com  $20\pm 2^\circ\text{C}$  e humidade relativa (HR) acima de 95%. Após 7 horas de cura, os prismas PCP e PCR para análise morfológica (TG e DRX) foram cuidadosamente desmoldados, e duas amostras, com cerca de 5 mm de espessura, foram cortadas de cada um. Os restantes provetes foram curados em água até à seguinte idade de análise (14 horas, 1, 3, 7 e 28 dias) e o mesmo procedimento foi realizado. Em cada idade, as amostras recolhidas foram imersas em isopropanol (>90% de pureza) para interromper o desenvolvimento de hidratação. O isopropanol foi trocado periodicamente após 1, 3, 12 e 24 horas, conforme sugerido na literatura [13]. Por fim, os provetes foram secos em estufa a  $60^\circ\text{C}$  por 48 horas e mantidos num exsiccador até à realização dos ensaios (TG, DRX). As amostras para caracterização mecânica foram mantidas na câmara climática referida até à idade do ensaio.

Na análise de TG, uma amostra (cerca de 60 mg) por cada composição foi aquecida a  $10^\circ\text{C}/\text{min}$  da temperatura ambiente até  $950^\circ\text{C}$ . As amostras foram previamente moídas e homogeneizadas antes do teste. Os testes foram realizados numa termobalança NETZSCH STA 449F3, com atmosfera de nitrogénio. O grau de hidratação ( $\alpha\text{TG}$ ) das pastas endurecidas foi estimado a partir do quociente entre a água combinada não evaporável ( $A_c$ ), determinada a partir da Eq.(1), e a água necessária para a hidratação completa do cimento anidro, que é simplesmente assumida como 0,23 em peso de cimento para CP [14]. Na Eq.(1),  $L_{dh}$ ,  $L_{dx}$  e  $L_{dc}$  correspondem à perda de massa nas etapas de desidratação ( $105\text{-}400^\circ\text{C}$ ), desidroxilação ( $400\text{-}500^\circ\text{C}$ ) e descarbonatação ( $>500^\circ\text{C}$ ). O  $L_{dca}$  é um fator de correção relativo à descarbonatação do filer calcário no cimento original. Ainda na Eq. (1)  $M_{CH}$ ,  $M_{H_2O}$  e  $M_{CO_2}$  são os pesos moleculares de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{CO}_2$ , respetivamente.

$$A_c = L_{dh} + L_{dx} + \frac{M_{H_2O}}{M_{CO_2}} \times (L_{dc} - L_{dca}) \quad (1)$$

$$CH = L_{dx} \times \frac{M_{CH}}{M_{H_2O}} + \frac{M_{CH}}{M_{CO_2}} \times (L_{dc} - L_{dca}) \quad (2)$$

As fases cristalinas de CP e CR anidro e hidratado foram identificadas através de DRX na configuração Bragg-Brentano (Bruker D8 Advance DaVinci) com radiação  $\text{Cu-K}\alpha$  filtrada com Ni ( $\lambda = 1,5406 \text{ \AA}$ ) produzida a 40 kV e 40 mA, com detector linear (Lynxeye 1-D). Os conjuntos de dados foram registados na faixa de  $5\text{-}80^\circ 2\theta$  com tamanho de etapa de  $0,02^\circ$ , 0,5 s por etapa e taxa de rotação de 15 rpm. As amostras foram previamente moídas para obtenção de um pó fino e homogêneo. Os difractogramas obtidos foram utilizados para análise quantitativa por refinamento de Rietveld. O software TOPAS 5.0 (Bruker AXS) foi utilizado para a quantificação das fases com a abordagem dos parâmetros fundamentais. Neste estudo, foi adotada a quantidade de CH determinada por meio de análise termogravimétrica como padrão de referência. Esta metodologia tem a vantagem de evitar a interferência do padrão interno e problemas de homogeneização na preparação das amostras [15], pois a mistura a seco não garante uma boa homogeneização, e o uso de água alteraria o processo de hidratação. O software TOPAS, além de fornecer a quantidade de fases cristalinas, também calcula a quantidade de fase amorfa.

As cinéticas de hidratação de CP e CR foram analisadas por CI, de acordo com o método de mistura externa da NP EN 196-11 [16], para temperatura constante de  $20^\circ\text{C}$ . Os testes foram realizados em pastas preparadas fora do calorímetro, utilizando água destilada e a/c de 1,0. A liberação de calor durante a hidratação foi registada durante os primeiros 7 dias, a partir da estabilização térmica da amostra no calorímetro, que ocorreu após cerca de 45 minutos.

As pastas produzidas com CP e CR também foram caracterizadas quanto à fluidez e resistência mecânica, conforme a NP EN 1015-3 [17] e a NP EN 1015-11 [18] respetivamente. Para cada

composição e idade, as resistências à flexão e à compressão foram determinadas aos 1, 3, 7, 28 e 90 dias.

## Resultados e discussão

**Calor de hidratação.** A Figura 1 mostra o fluxo de calor (Figura 1a) e o calor cumulativo (Figura 1b) ao longo do tempo de pastas com CP, NT e CR. Como foi adotado o método de mistura externa, apenas foi medida a liberação de calor após 45 minutos. Apesar disso, neste estágio inicial de hidrólise, o fluxo de calor do CR foi cerca de duas vezes superior ao do CP. Esta elevada liberação de calor do CR foi também observada por outros autores [3, 4, 7, 8, 19], sendo atribuída à elevada área superficial e instabilidade dos produtos desidratados [3, 7], ao elevado teor em aluminatos de cálcio intermédios [4] e/ou à hidratação de CaO livre [3, 19, 20]. Como esperado, a liberação de calor ao longo do tempo não foi significativa no NT, confirmando a não reatividade do resíduo de pasta de cimento sem ativação térmica.

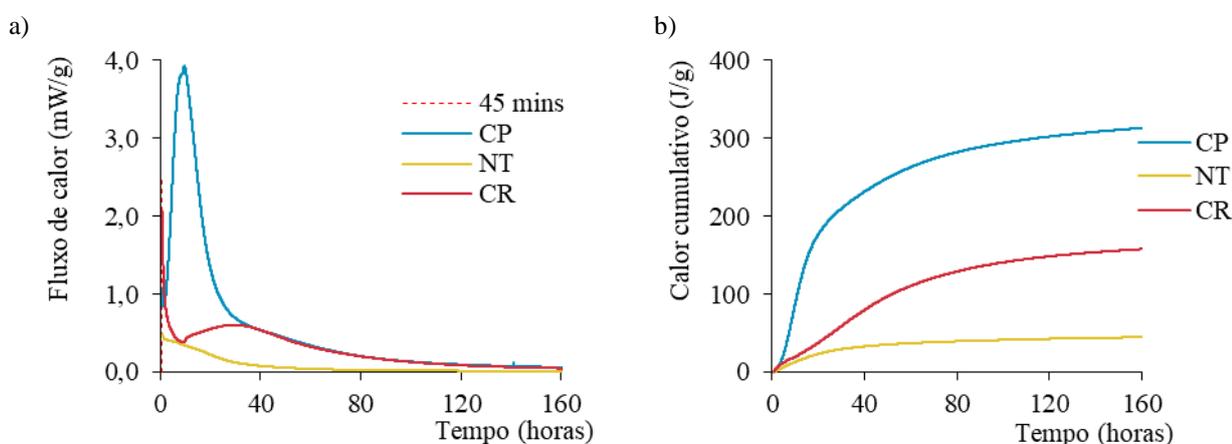


Figura 1: Fluxo de calor (a) e calor cumulativo (b) ao longo do tempo de pastas com CP, CR e NT (a/l = 1,0)

Após cerca de 3 horas de hidratação, o calor cumulativo do CR foi menor que o do CP (Figura 1b). O calor cumulativo de CR teria sido significativamente maior se os primeiros 45 minutos de hidratação tivessem sido medidos. Em análises de CI com mistura interna, outros autores observaram que a liberação de calor do CR foi cerca de 10 vezes maior que a de CP [4, 21].

A reidratação inicial do CR seguiu as etapas de indução, aceleração e desaceleração (Figura 1a), típicas de um mecanismo de dissolução-precipitação. O período de indução foi seguido por um segundo pico de aceleração e a liberação progressiva de calor ao longo do tempo indica que a reidratação imediata do CR não é o único mecanismo regulador. No entanto, o CR apresentou períodos de indução e aceleração mais prolongados com menor fluxo de calor do que o CP (Figura 1a). Durante a fase de aceleração, o pico de hidratação do CR foi 6,5 vezes menor e ocorreu cerca de 3 vezes mais tarde do que no CP (ou seja, ocorreu em torno de 10 horas no CP e somente após 30 horas no CP). Após o pico de aceleração a liberação de calor ao longo do tempo foi semelhante no CR e no PC.

**Resistência mecânica.** Como esperado, para a mesma a/l a fluidez da PCR (consistência normal) foi significativamente menor que a da PCP (fluido). Isto resulta da maior exigência de água do CR. As massas volúmicas de PCR e PCP, medidas pela NP EN 1015-10 [22], foram ambas em torno de 1740 kg/m<sup>3</sup>. Esta similaridade era esperada visto que as massas volúmicas de CR e CP foram também idênticas (Tabela 1).

As Figuras 2 e 3 mostram a resistência à compressão e flexão de PCR e PCP ao longo do tempo, respetivamente. As barras de erro representam o desvio padrão das amostras. O desenvolvimento de resistência da PCR é comparável à da PCP até 3 dias, e depois diminui até 90 dias. O desenvolvimento inicial da resistência de pastas com CR é documentado por vários autores [4, 7, 8], e explicado pela elevada área superficial e rápida reidratação. No entanto, Bogas et al. [5] verificaram que esta tendência não se confirma até 1 dia, com a resistência à compressão da PCR

cerca de 50% inferior à da PCP. De facto, a hidratação mais significativa do CR só foi observada após 24 horas (Figura 1). Isso também está de acordo com os tempos de presa mais longos observados no CR do que em pastas de CP (Tabela 1).

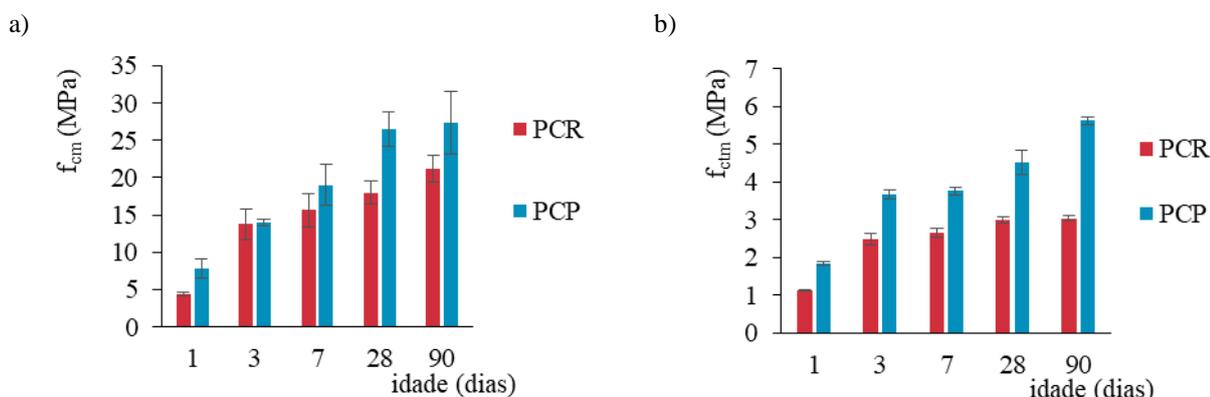


Figura 2: Resistência à compressão (a) e resistência à flexão (b) de PCR e PCP ao longo do tempo

Como demonstrado num estudo anterior [5], uma vez que parte da água de mistura é consumida no desenvolvimento de produtos de hidratação intrapartícula nas partículas porosas de CR, o espaço interpartícula disponível é reduzido e a  $a/l$  da pasta entre partículas torna-se menor. Isto leva a uma maior proximidade entre as partículas, melhorando a coesão microestrutural e o desenvolvimento precoce da resistência [2, 5]. Após 3 dias, a resistência relativa do PCR diminuiu e a resistência à compressão aos 28 dias foi cerca de 68% da obtida em PCP. Como também observado por Bogas et al. [5], isso sugere que, em idades mais avançadas, nas pastas com CP são formados mais produtos de hidratação externos. Por sua vez, nas pastas com CR, parte da hidratação ocorre na forma de produtos de hidratação internos, dentro dos grãos de CR e que não contribuem para melhorar a coesão entre as partículas [5].

**Termogravimetria.** As Figuras 3 e 4 apresentam as curvas TG e dTG de CR e CP, bem como as de PCR e PCP ao longo do tempo de hidratação. O CP apresentou grandes perdas de massa em torno de 140 °C e 700-800 °C, atribuídas respetivamente à decomposição do gesso e descarbonatação de filler calcário. Por outro lado, o CR, previamente tratado a 700 °C, não apresentou perdas de massa significativas por desidratação. No entanto, entre 340-460 °C observou-se uma perda de massa menos esperada relacionada com a formação de CH, o que sugere a hidratação precoce do CaO livre após tratamento térmico e armazenamento. Além disso, o CR apresentou maior perda de massa acima de 600 °C do que o CP, indicando maior quantidade de produtos carbonatados que provavelmente se formaram durante os 3 meses de armazenamento e após os processos de moagem e tratamento térmico.

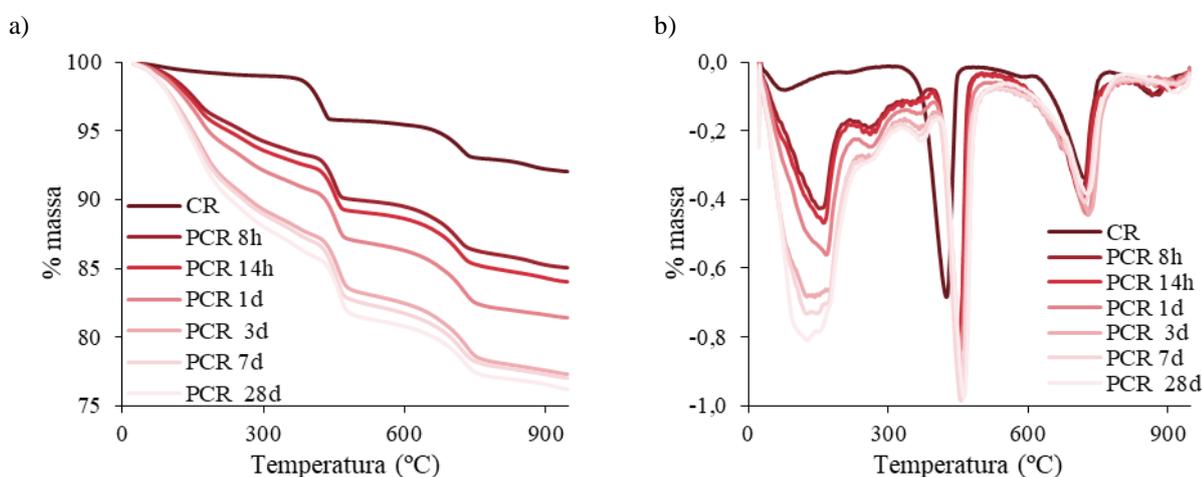


Figura 3: Curva TG (a) e dTG (b) de CR e pastas PCR ao longo do tempo

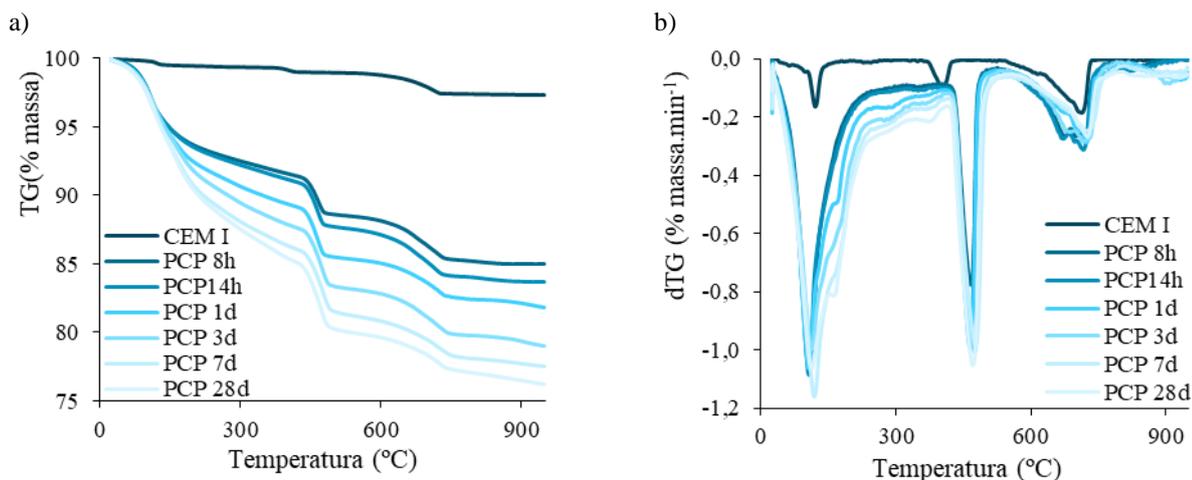


Figura 4: Curva TG (a) e dTG (b) de CP e pastas PCP ao longo do tempo

Assim como no CP, no CR a quantidade de água combinada e o respectivo grau de hidratação ( $\alpha_{TG}$ ) aumentaram ao longo do tempo de hidratação (Tabela 2), o que demonstra sua adequada capacidade de reidratação. Além disso, as perdas de massa em ambos os ligantes foram da mesma magnitude e em intervalos semelhantes. A faixa de temperaturas de desidroxilação do CH foi maior nas pastas de PCP e PCR, comparativamente ao CP e ao CR. Isto pode ser atribuído à formação de CH a partir da hidratação de silicatos de cálcio anidros [2].

Nas PCP, o pico a 110 °C sugere a presença de etringite acima de 8 horas, o que é corroborado pela análise de DRX. Após 1 dia, um segundo pico é desenvolvido torno de 160-190 °C e outro em 290-295 °C, que estão relacionados com a formação de monossulfoaluminatos de cálcio (AFm-Ms) [5, 23]. A quantidade de CH (entre 410-540 °C) aumentou progressivamente com o tempo de hidratação, principalmente acima das 8 horas quando a fase de aceleração assume maior relevância (Figura 1). Na PCR, o pico em torno de 110 °C não é evidente, indicando baixo teor de etringite. No entanto, dois picos atribuídos às fases AFm em torno de 163-170 °C e 255-265 °C são observados a partir das 8 horas. Em comparação com as pastas de CP, os valores mais baixos do segundo pico sugerem a presença de carboaluminatos [23].

Tabela 2: Perdas de massa, água combinado,  $A_c$ , grau de hidratação,  $\alpha_{TG}$ , e CH de CP e CR anidro, PCP e PCR das 8 horas aos 28 dias de hidratação

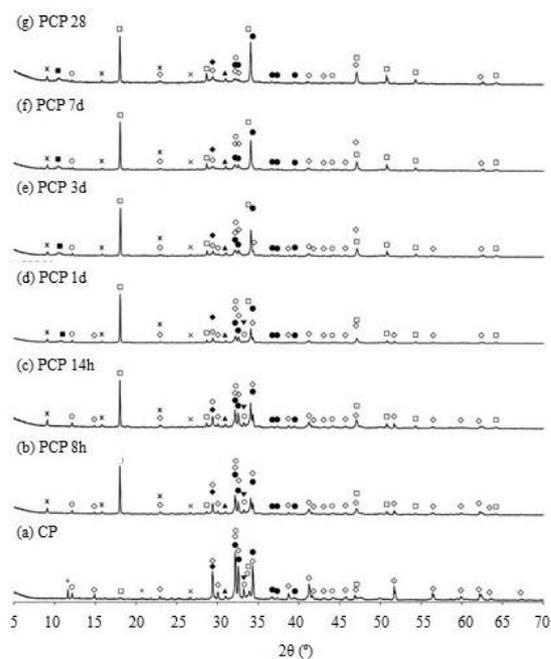
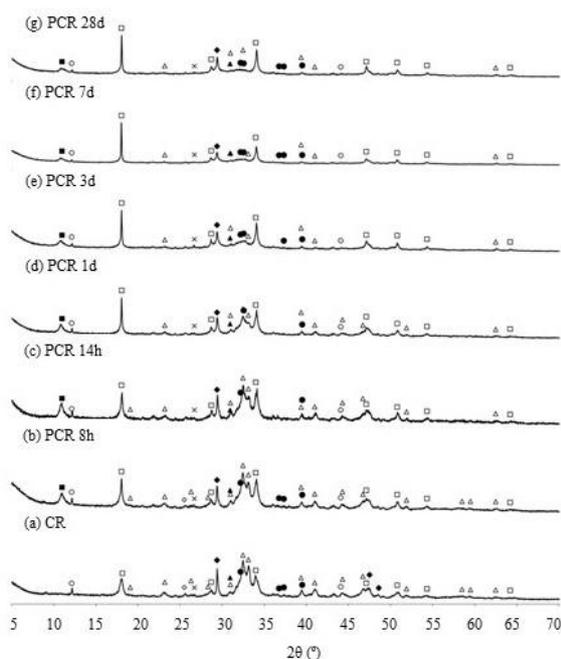
Amostra	$Ldh$	$Ldx$	$Ldc$	$A_c$	$\alpha_{TG}$	CH
	(wt%)	(wt%)	(wt%)	(%)	(%)	(%)
CP	0.5	0.3	1.73	0.8	3.5	1.2
CR	0.67	3	3.77	3.7	16	12.3
PCP 8h	6.45	2.4	3.72	9.7	42.3	13.5
PCP 14h	6.83	2.7	4.21	10.6	46.2	15.6
PCP 1d	8.31	3.2	3.88	12.5	54.3	17.2
PCP 3d	10.29	3.7	4.51	15.2	66.3	20.4
PCP 7d	11.8	3.9	4.11	16.8	73	20.6
PCP 28d	12.65	4	4.29	17.8	77.5	21.3
PCR 8h	6.1	2.6	5.38	9.5	41.2	13.9
PCR 14h	6.67	2.7	5.54	10.2	44.5	14.6
PCR 1d	8.2	2.9	6	12.2	53	16.3
PCR 3d	10.79	3	6.38	15.1	65.5	17.6
PCR 7d	11.26	3.2	5.98	15.6	67.7	17.8
PCR 28d	12.08	3.3	5.75	16.4	71.4	17.9

Após 1 dia de hidratação, a perda de massa entre 100 e 200 °C aumentou significativamente na PCR, conduzindo a um aumento de 32% do  $Ldh$  entre 1 e 3 dias (Tabela 2). Isto sugere que se desenvolve mais C-S-H durante este período, refletindo-se num aumento significativo do grau de hidratação do CR. O valor de  $Ldh$  aos 3 dias foi ainda ligeiramente superior ao do CP à mesma idade. Isso corrobora a evolução da resistência mecânica, com a resistência à compressão de PCR aos 3 dias igualando-se à de PCP de igual a/l. No entanto, após 3 dias a quantidade de produtos de hidratação em CR estabilizou e o aumento adicional de água combinada e grau de hidratação não foi tão significativo (Tabela 2). Acima desta idade, a quantidade de produtos hidratados foi maior nas pastas de CP.

A faixa de  $Ldx$  foi semelhante em PCR e PCP, entre 410-490 °C e 420-500 °C, respetivamente (Figuras 3 e 4), sugerindo a formação do mesmo tipo de CH. No entanto, embora o teor de CH estimado em PCR tenha sido maior do que em PCP em idades precoces, após 14 horas é menor. Por um lado, a hidratação do CaO livre contribuiu para o aumento precoce do teor de CH na PCR. Por outro lado, a hidratação rápida de  $C_3S$ , apenas significativa em CP, gera duas vezes mais CH que o  $C_2S$  [24]. Note-se que já é levado em consideração que parte do CH em CP e CR foi transformado em  $CaCO_3$  de acordo com a Eq. (2). No entanto, o teor de calcite da PCR foi maior que a da PCP na mesma idade ( $Ldc$ ). Conforme discutido, PO, o resíduo de cimento que originou o CR, encontrava-se mais carbonatado do que o CP (Tabela 2). De facto, como a ativação térmica a 700 °C resultou na desidratação do PO sem descarbonatação significativa, o CR ainda continha produtos de carbonatação, que persistiram na PCR. Portanto, o CR anidro apresentou menor volume de produtos potencialmente hidratáveis do que o CP, contribuindo para a formação a longo prazo de menos C-S-H e CH ( $Ldh$  e  $Ldx$ , Tabela 2). O grau de hidratação estimado ( $\alpha_{TG}$ ) foi sempre maior no PCP do que no PCR, o que não deve ser explicado apenas pela maior quantidade de CH desenvolvida neste cimento. Conforme mencionado, a água necessária para hidratação completa foi assumida como 0,23 para o cimento anidro. No entanto, a quantidade de  $C_3S$  em CR não é significativa, o que significa que a água combinada deve ser menor. De facto, a água quimicamente ligada por  $C_3S$  e  $C_2S$  é de cerca de 24 e 21%, respetivamente [14]. Se para a água de hidratação na PCR fosse considerado 0,22, o  $\alpha_{TG}$  aumentaria para 74,8% aos 28 dias. Além disso, o valor de  $\alpha_{TG}$  na Tabela 2 não considera a parte dos produtos anidros que é carbonatada e não contribui para a  $A_c$ . Se a quantidade de  $A_c$  for convertida para a massa da amostra não carbonatada (assumindo dos resultados de TG na Tabela 2, cerca de 3,9% e 8,3% de  $CaCO_3$  em CP e CR, respetivamente), o novo  $\alpha_{TG}$  torna-se ligeiramente maior em PCR (80,5%) do que em PCP (80,1%). Por outras palavras, embora o volume total de hidratos tenda a ser maior em PCP, uma maior fração de compostos anidros pode ser hidratada em PCR.

**Difração de raios-X.** As principais fases cristalinas identificadas em PCR e PCP ao longo do tempo de hidratação são apresentadas nas Figuras 5 e 6, respetivamente. As fases cristalinas identificadas no CR foram o polimorfo de alta temperatura  $\alpha'_H-C_2S$ ,  $\beta-C_2S$ , fases de aluminatos, produtos carbonatados e CH (também encontrado na análise de TG).

Considerando que o CR foi tratado a 700 °C, seria esperado CaO ao invés de CH, devido à desidroxilação deste último durante o tratamento térmico. No entanto, como também reportado noutros estudos [1, 11], o CaO no CR é altamente propenso a reidratar após tratamento térmico. Fases de aluminatos de cálcio desidratadas pouco cristalinas, previamente identificadas por Baldusco et al. [4] através de MEV, não foram detetados por DRX. Além disso, a presença de  $C_3S$  residual em CR não foi detetada dentro do limite de deteção do difratómetro (Figura 5).



Legenda: □ Ca(OH)<sub>2</sub> (Portlandite); ◆ CaCO<sub>3</sub> (Calcite); ▲ CaMg(CO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> (Dolomite); ● β-C<sub>2</sub>S; △ α'-C<sub>2</sub>S; ○ C<sub>4</sub>AF (Brownmillerite); × Quartzo; ■ Carboaluminatos hidratados.

Figura 5: DRX de CR (a) e PCR (b-g) entre as 8 horas e os 28 dias

Figura 6: DRX de CP (a) e PCP (b-g) entre as 8 horas e os 28 dias

Observou-se a formação de um polimorfo de C<sub>2</sub>S, semelhante a α'-C<sub>2</sub>S, obtido da decomposição de C-S-H (Figura 5). Considerando uma ampla faixa de temperaturas de ativação térmica (400-900 °C), Real et al. [2] reportam que este tipo de nesossilicato é formado essencialmente entre 600 °C e 800 °C, sendo progressivamente transformado em β-C<sub>2</sub>S a temperaturas mais elevadas. A formação de α'-C<sub>2</sub>S a baixa temperatura é atribuída ao facto de o CR ser ativado a partir de silicatos de cálcio nanocristalinos de elevada área superficial [25]. Foi observada uma redução progressiva da intensidade relativa do pico de α'-C<sub>2</sub>S, principalmente após 1 dia, indicativa da reação de fase (Figura 5). Seguidamente observou-se o aumento da formação de CH. Em PCP, a redução de β-C<sub>2</sub>S ao longo do tempo ocorreu em idades mais tardias, acima de 7 dias (Figura 6), confirmando a reatividade mais lenta deste polimorfo de C<sub>2</sub>S [26].

A quantificação da evolução das fases cristalinas nas pastas de CP e CR foi realizada através de refinamento de Rietveld, o que permitiu acompanhar o desenvolvimento de fase durante a hidratação. Conhecendo a quantidade de CH ao longo do tempo (determinada através da análise de TG), foi possível estimar o conteúdo amorfo em cada amostra. Neste caso, o CH foi estimado diretamente a partir da perda de peso por desidroxilação,  $L_{dx}$ , sem a correção indicada na Eq. (2). A precisão da determinação da fração cristalina e amorfa é afetada pela precisão da determinação de CH a partir de TG, bem como pela suposição de que o teor de CH é o mesmo nas amostras testadas para DRX e TG. No entanto, amostras para análise de TG e DRX foram recolhidas e preparadas do mesmo modo e ao mesmo tempo. A percentagem em massa das fases anidras e hidratadas ao longo do tempo são apresentadas na Tabela 3 e nas Figuras 7 e 8.

Tabela 3: Fases cristalinas em CP, CR, PCP e PCR entre as 8 horas e os 28 dias, do refinamento de Rietveld

Fase	Fracção refinada com a quantidade de CH como referência interna (%)													
	CP <sup>a</sup>	PCP						CR <sup>a</sup>	PCR					
		8 h	14 h	24 h	3 d	7 d	28d		8 h	14 h	24 h	3 d	7 d	28d
Calcite	2,7	3,04	2,7	2,7	2,9	3	3,9	7,61	5,24	6,0	7,26	6,32	6,32	6,05
Ettringite	0	1,0	1,5	1,1	0,7	0,7	0,6	0,1	0,0	0,05	0,0	0,02	0,05	0,0
Portlandite (CH)	2,2	9,87	11,1	13,1	15,2	16,0	16,4	12,3	10,69	11,1	11,9	12,3	13,1	13,5
AFm-Mc <sup>b</sup>	-	-	-	<0,1	0,1	0,2	0,5	-	0,48	0,4	0,3	0,2	0,2	0,4
AFm-Hc <sup>b</sup>	-	-	-	0,6	0,7	0,7	0,7	-	0,8	1,0	0,7	0,5	0,4	0,4

Como a massa total de sólidos não é constante durante a hidratação do cimento, os resultados do refinamento Rietveld para as amostras hidratadas foram escalados para a fracção de cimento anidro, levando em consideração o teor de água combinada. Isso possibilitou a análise da evolução das fases e comparação com a composição do cimento anidro. Por outras palavras, um cálculo inverso dos resultados foi realizado na mesma base para determinar o grau de reação. Portanto, as fases foram redimensionadas à base anidra, de acordo com a Eq. (3), onde  $w_{\text{escalado}}$  é a percentagem calculada de volta em base seca,  $w_{\text{Rietveld}}$  é a percentagem em peso dessa fase obtida da análise de refinamento de Rietveld e  $A_c$  é o teor de água combinada determinada a partir da análise TG. A evolução de fase dos principais compostos anidros em PCR e PCP é apresentada nas Figuras 7 e 8, respetivamente.

$$w_{\text{escalado}} = \frac{w_{\text{Rietveld}}}{(1-A_c)} [\%] \quad (3)$$

Em relação aos produtos anidros, verificou-se que o CR era composto principalmente por  $C_2S$  (60%), dos quais 93% era  $\alpha'$ - $C_2S$  (56%) e 7% era  $\beta$ - $C_2S$  (4%), calcita (8%) e portlandite (12%) reidratada a partir de cal livre. Por outro lado, o CP foi composto principalmente por  $C_3S$  (55%),  $\beta$ - $C_2S$  (19%),  $C_3A$  (5%) e  $C_4AF$  (7%).

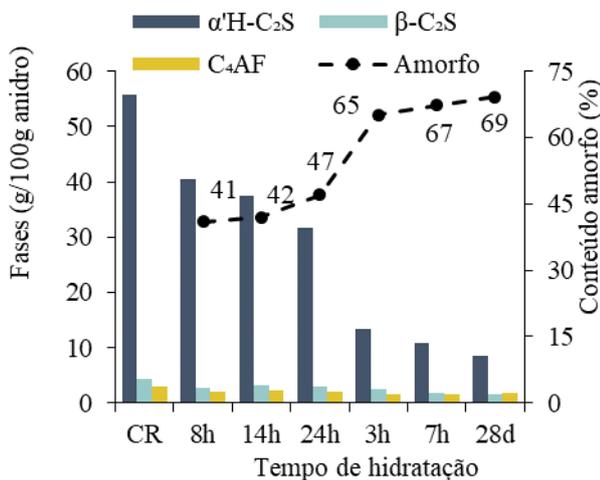


Figura 7: Desenvolvimento de fases ao longo do tempo de CR e PCR

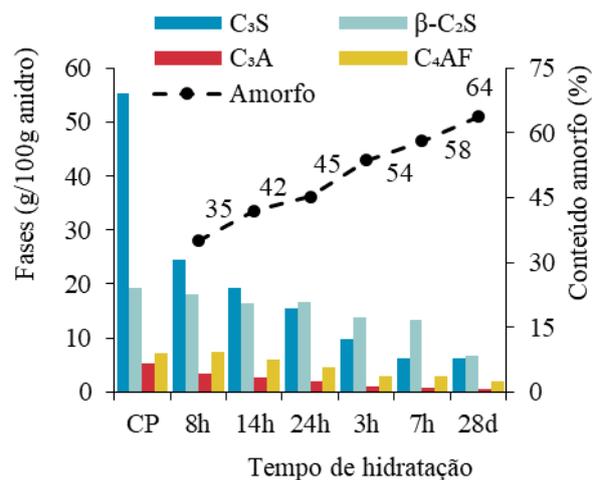


Figura 8: Desenvolvimento de fases ao longo do tempo de CP e PCP

Na PCR foi confirmado um consumo progressivo de  $\alpha'$ - $C_2S$ , com reação mais significativa entre 24 horas e os 3 dias. Isto está de acordo com os resultados de TG e com o pico de aceleração tardia encontrado na calorimetria (>30 horas). A fase  $\beta$ - $C_2S$  estava quase inativa em idade precoce, apenas começando a reagir após 3 dias, após o consumo significativo de  $\alpha'$ - $C_2S$ . Confirmou-se assim a maior reatividade inicial do novo nesossilicato. Ao contrário do PCP, o PCR apresentou maior teor de CH a partir de idades jovens, devido à rápida reidratação de CaO (Tabela 3).

Após 24 horas, a reação da PCR foi mais significativa e conduziu a um aumento relevante da quantidade de produtos de hidratação amorfos (Figura 7). Embora as fases de AFm sejam pouco

identificadas pela análise de DRX, os carboaluminatos de AFm cristalinos foram detetados a partir de 8 horas, o que está de acordo com a análise de TG. A etringite não foi detetada em nenhuma idade, possivelmente pela quantidade presente se encontrar abaixo do limite de detecção do difratômetro, o que corrobora os resultados do TG.

Na PCP, o rápido consumo de  $C_3S$  foi acompanhado por um aumento progressivo da quantidade de CH e produtos de hidratação amorfos (Figura 8). Confirma-se a baixa reatividade do  $\beta-C_2S$ , cuja reação só foi significativa após 7 dias, um pouco mais tarde do que na PCR. Conforme documentado na literatura [26], a reação do  $\beta-C_2S$  é mais rápida quando o  $C_3S$  não está presente, como ocorre no CR. Como esperado, a etringite foi formada desde cedo e o seu conteúdo diminuiu progressivamente ao longo do tempo de hidratação (Tabela 3) sendo provavelmente transformado em fases AFm, conforme sugerido pela análise de TG, especialmente após 1 dia.

O grau de hidratação de cada fase pode ser estimado como a razão entre o consumo da fase e seu conteúdo original. Aos 28 dias, o grau de reação estimado na PCP foi de 88,7% para  $C_3S$  e 65,4% para  $\beta-C_2S$ . Na PCRE, o grau de reação de  $\alpha'_H-C_2S$  e  $\beta-C_2S$  foi de 84% e 62,9%, respectivamente. No geral, o grau de reação dos silicatos de cálcio aos 28 dias foi muito semelhante em PCP (82,6%) e PCR (83,1%). No entanto, como sugerido pelos resultados da análise de TG, a fração de hidratos de silicato de cálcio reagidos no PCR tendeu a ser ligeiramente maior do que na PCP, devido ao seu menor teor da fase menos reativa  $\beta-C_2S$ . Isso compensou a reação ligeiramente menor de  $\alpha'_H-C_2S$  do que  $C_3S$ . Destaca-se o aumento significativo do grau de reação de  $\alpha'_H-C_2S$  entre 1 e 3 dias, que passou de 43% para 76%. Conforme encontrado na análise de TG, a PCR apresentou maior teor de calcita do que a PCP (Tabela 3). No entanto, a quantidade de produtos carbonatados foi inferior à determinada pela análise de TG.

O alto teor de amorfos em PCR e PCP pode ser afetado por uma eventual subestimação do teor de CH não corrigido obtido a partir da análise de TG, o que está em linha com a maior quantidade estimada de produtos de carbonatação. Houve um aumento mais uniforme de compostos amorfos em PCP do que em PCR. Após 3 dias, o consumo adicional de  $\alpha'_H-C_2S$  não foi significativo e a quantidade de produtos amorfos aumentou apenas ligeiramente. O estado não cristalino dos aluminatos de cálcio intermédios identificados em CR anidro [4] e desde 8 horas em PCR contribuiu para o maior teor amorfo observados nesta pasta em relação à PCP (Tabela 3).

## Conclusão

Este trabalho analisou a reidratação do CR ao acompanhar o desenvolvimento de fase em idades iniciais de hidratação, por meio de análises de TG/dTG e DRX. Foi realizada uma comparação entre a PCR e a PCP de referência de composição semelhante tendo-se obtido as seguintes conclusões:

- As análises TG/dTG sugerem a rápida formação de fases AFm na PCR, pelo menos desde as 8 horas. A partir de DRX, apenas carboaluminatos hidratados de mais cristalinos puderam ser detetados.

- Os difractogramas de raios-X mostraram picos de  $\alpha'_H-C_2S$  em CR anidro que progressivamente diminuíram com a hidratação após 1 dia, sinalizando a elevada reatividade deste novo nesossilicato. A análise de Rietveld mostrou que o  $\alpha'_H-C_2S$  apresentou maior taxa de reação entre 1 e 3 dias, o que esteve em linha com TG/dTG e o pico de aceleração tardia encontrado na análise de CI. Os picos de  $\beta-C_2S$  só foram reduzidos após 7 e 3 dias nas pastas PCP e PCR, respetivamente, confirmando a menor reatividade inicial desse polimorfo  $C_2S$ .

- O excesso de produtos carbonatados em CR, originalmente presentes no material precursor e não descarbonatados durante o tratamento térmico, reduziu o volume total de produtos potencialmente hidratáveis. Mesmo assim, os resultados de TG mostraram um grau de hidratação da PCR ligeiramente superior ao da PCP, sugerindo que uma maior fração de compostos anidros reidratados em CR do que em CP. Isto foi atribuído ao menor teor de  $\beta-C_2S$  no PCR, que compensou a taxa de reação ligeiramente menor do  $\alpha'_H-C_2S$  em comparação com  $C_3S$ , conforme encontrado na análise de Rietveld.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (FCT) o financiamento desta investigação no âmbito dos projetos PTDC/ECI-COM-28308/2017 e às unidades de investigação CERIS (PTDC/ECI-CON/0704/2021) e CeFEMA (UIDB/ECI/04625/2019). O terceiro autor gostaria também de agradecer à FCT o financiamento providenciado pela bolsa de doutoramento SFRH/BD/146033/2019. Os autores agradecem também à empresa SECIL o fornecimento dos materiais para a campanha experimental.

## Referências

- [1] A. Carriço, J.A. Bogas, M. Guedes, *Thermoactivated cementitious materials - a review*, Constr. Build. Mater., 250 (2020) 118873.
- [2] S. Real, A. Carriço, J.A. Bogas, M. Guedes, *Influence of the treatment temperature on the microstructure and hydration behavior of thermoactivated recycled cement*, Materials (Basel), 13 (2020) 3937.
- [3] J. Wang, M. Mu, Y. Liu, *Recycled cement*, Constr. Build. Mater., 190 (2018) 1124–1132.
- [4] R. Baldusco, T.R.S. Nobre, S.C. Angulo, V.A. Quarcioni, M.A. Cincotto, *Dehydration and Rehydration of Blast Furnace Slag Cement*, J. Mater. Civ. Eng., 31 (2019) 1–13.
- [5] J.A. Bogas, A. Carriço, A.J. Tenza-Abril, *Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes*, Cem. Concr. Res., 138 (2020) 106226.
- [6] J.A. Bogas, M.F.C. Pereira, A.M. Guedes, A. Carriço, S. Hu, R. Sousa, *Separation process of waste hardened concrete for obtaining recycled cement from waste concrete*, Application no. 116130, 2020.
- [7] Z. Shui, D. Xuan, W. Chen, R. Yu, R. Zhang, *Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures*, Constr. Build. Mater., 23 (2009) 531–537.
- [8] J.A. Bogas, A. Carriço, M.F.C. Pereira, *Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars*, J. Clean. Prod., 218 (2019) 377–389.
- [9] R. Yu, Z. Shui, *Influence of agglomeration of a recycled cement additive on the hydration and microstructure development of cement based materials*, Constr. Build. Mater., 49 (2013) 841–851.
- [10] L. Zhang, Y. Ji, G. Huang, F. Gao, Z. Dong, *Effect of retarders on the early hydration and mechanical properties of reactivated cementitious material*, Constr. Build. Mater., 212 (2019) 192–201.
- [11] A. Carriço, S. Real, J.A. Bogas, M.F.C. Pereira, *Mortars with thermo activated recycled cement: fresh and mechanical characterisation*, Constr. Build. Mater., 256 (2020) 119502.
- [12] NP EN 196-3 Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2016.
- [13] K. Scrivener, A. Bazzoni, B. Mota, J.E. Rossen, *Chapter 8 – Electron microscopy*, In: Scrivener, Karen L.; Snellings, Ruben; Lothenbach, B. (Ed.), A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials, Taylor and Francis Group (2016) 353–417.
- [14] A. Neville, *Properties of concrete*, Fourth and final edition, standards updated to 2002. Longman, reprinted (2004).
- [15] R. Snellings, *Chapter 4 – X-ray powder diffraction applied to cement*, In: K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach, (Eds.), A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials, CRC Press, Taylor and Francis Group (2016) 107–176.

- [16] NP EN 196-11, Methods of testing cement. Part 11: Heat of hydration. Isothermal Conduction Calorimetry method. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium (2018).
- [17] NP EN 1015-3, Methods of test for mortar for masonry. Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium (1999).
- [18] NP EN 1015-11, Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium (2019).
- [19] S.C. Angulo, M.S. Guilge., V.A. Quarcioni., R. Balduco, M.A. Cincotto, *Rehydration of Cement Fines: a Tg /Calorimetry Study*, III Prog. Recycl. Built Environ. (2015) 222–229.
- [20] R. Serpell, M. Lopez, *Properties of mortars produced with reactivated cementitious materials*, Cem. Concr. Compos., 64 (2015) 16–26.
- [21] L. Zhang, Y. Ji, G. Huang, J. Li, Y. Hu., *Modification and enhancement of mechanical properties of dehydrated cement paste using ground granulated blast-furnace slag*, Constr. Build. Mater., 164 (2018) 525–534.
- [22] NP EN 1015-10: Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar. European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium (1999).
- [23] B. Lothenbach, P. Durdziński, K. De Weerd, *Chapter 5 -Thermogravimetric analysis*, In: K. Scrivener, R. Snellings, B. Lothenbach (Ed.), *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*, Taylor and Francis Group (2016) 177–211.
- [24] H.F.W. Taylor, *Cement chemistry*, Thomas Telford, (1997).
- [25] T. Link, F. Bellmann, H. M. Ludwig, M. Ben Haha, *Reactivity and phase composition of Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> binders made by annealing of alpha-dicalcium silicate hydrate*, Cem. Concr. Res., 67 (2015) 131–137.
- [26] K. Scrivener, A. Nonat, *Hydration of cementitious materials, present and future*, Cem. Concr. Res., 41 (2011) 651–665.

## Micro-indicadores de circularidade para o setor de construção civil na perspectiva de produtos plásticos

MATOS Joana<sup>1,a</sup>, MARTINS Carla I.<sup>1,b</sup> e SIMOES Ricardo<sup>1,2,c</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Polímeros e Compósitos (IPC), Universidade do Minho, 4800-058 Guimarães, Portugal

<sup>2</sup> Instituto Politécnico do Cávado e Ave (IPCA), 4750-810 Barcelos, Portugal

<sup>a</sup>id9458@alunos.uminho.pt, <sup>b</sup>cmartins@dep.uminho.pt, <sup>c</sup>rsimoes@ipca.pt

**Palavras-chave:** Economia Circular, Circularidade, Micro-indicadores, Construção Civil, Plásticos.

**Resumo.** Ao longo das últimas décadas, assistimos a um aumento global contínuo no consumo de plásticos, sendo a construção civil um dos maiores contribuidores para este efeito. Contudo, embora os plásticos proporcionem aspetos e propriedades positivas às aplicações da construção civil, a sua sustentabilidade é uma preocupação. Atualmente a maioria das aplicações plásticas aplicadas na construção civil são projetadas e fabricadas sem uma prudente reflexão sobre a sua gestão em fim de vida. Associado ao aumento do uso de materiais plásticos, temos o crescimento populacional e a sua aglomeração em regiões urbanas, fortalecendo a procura por recursos para suprir as necessidades habitacionais da população. Estes fatores, impulsionados pelo comportamento irresponsável da sociedade perante os resíduos plásticos de construção e demolição, conduziu a uma crise global de poluição. Para colmatar esta crise, a maioria dos plásticos reciclados na europa são reintroduzidos na economia, durante a construção de novos edifícios e obras públicas, e embora as formas como são utilizados seja intitulada de sustentável, circular e amigas do ambiente, nem todas o são. Às vezes, misturar materiais plásticos reciclados a outros materiais de construção (como betão, asfalto, madeira, etc.), nada mais é do que consumir recursos plásticos, que alternativamente poderiam ter sido incinerados e sua energia recuperada. Preservar e otimizar os recursos existentes, e manter o valor econômico dos materiais plásticos, é fundamental para aumentar a circularidade na construção civil. Torna-se assim imperativo e urgente esclarecer os fabricantes de aplicações plásticas para a construção civil quanto aos conceitos e estratégias de economia circular e disponibilizar-lhes ferramentas que lhes permitam aferir a circularidade dos seus produtos. Existe um vasto conjunto de ferramentas de avaliação e monitorização da circularidade, onde estão incluídos os indicadores de circularidade. No entanto, os indicadores presentes na literatura, apresentam metodologias de cálculo incompatíveis, com requisição considerável de conhecimento em engenharia e concentram-se apenas em alguns dos aspetos do ciclo de vida do produto. Este artigo apresenta uma análise dos microindicadores de circularidade mais relevantes para avaliar a circularidade das aplicações plásticas no setor da Construção Civil, ao mesmo tempo que identifica diretrizes e boas práticas para promover a transição deste setor para uma economia mais circular.

### Introdução

O sector da construção civil é responsável por cerca de 9% do PIB europeu e por 18 milhões de postos de trabalho [1]. Do ponto de vista dos materiais, é um setor altamente intensivo no consumo de recursos e na geração de resíduos [2], sendo responsável por cerca de 39% da emissão de gases efeito de estufa na Europa [1]. Os impactos ambientais provocado por este sector na europa ronda os 50% do uso total de matérias-primas, 40% da energia final global consumida, 30% do consumo de água e 35% da geração de resíduos [2], [3].

Mais de 20% da produção total de plásticos na europa é encaminhada para aplicações na construção civil, tornando o setor da construção o segundo maior consumidor de plástico da europa [4], [5]. Os plásticos estão presentes em todas as peças de um edifício, como por exemplo, em tubagens, condutas, perfis de janelas, revestimentos de chão e paredes, tintas, colas, entre outros [4],

[6], [7]. Häkkinen, Kuittinen, and Vares 2019, no seu estudo, concluiu que o consumo de plástico num edifício ronda no seu total entre as 23-51 toneladas durante o seu ciclo de vida, e 58-79% destes plásticos são colocados no edifício na sua fase de construção. No entanto, o seu peso é inferior a 1% quando comparado com o peso total do edifício [4].

Atualmente, a população mundial corresponde a 7,9 biliões de habitantes, esperando-se que em 2050 seja de aproximadamente 9,6 biliões de pessoas [8]. Um pouco mais de metade da população mundial (54%) vive em áreas urbanas, sendo estas áreas responsáveis por 75% do consumo de recursos do planeta e 60-80% das emissões GEE [8]. Assim sendo, com o aumento da população e a sua aglomeração nas áreas urbanas, estima-se uma extração de 180 biliões de toneladas de matérias-primas do planeta em 2050 (o equivalente a 3 planetas terra) e como consequência uma alta geração de resíduos para suprir as necessidades habitacionais da população [8].

Quando direcionamos a nossa atenção para os RCDs (Resíduos de Construção e Demolição), os plásticos estão posicionados na segunda maior fração de resíduos, juntamente com os metais e o cartão, sendo a primeira fração referente aos minerais [9], [10]. Enquanto resíduos de betão e aço são cada vez mais retidos no ciclo dos materiais, por meio da reciclagem, para os restantes RCDs o cenário é bem diferente. Embora os plásticos provenientes das fases de construção do edifício, sejam separados, reaproveitados e reciclados, os plásticos resultantes da fase de demolição continuam a ser incinerados ou no pior cenário, depositados em aterros [4], [11].

Outra questão importante é o aumento dos custos das matérias-primas que impulsionam a construção civil a utilizar materiais alternativos de forma mais eficiente, por exemplo, materiais reutilizados ou reciclados [1].

Mais de 45% dos plásticos reciclados que entram na economia europeia são aplicados na construção de novos edifícios e em obras públicas [5]. E apesar de Awoyera and Adesina afirmar que as introduções de resíduos plásticos reciclados em aplicações na construção civil poderão solucionar o problema da gestão de resíduos sólidos e a exaustão de matérias-primas plásticas para fins na construção civil [12], esta afirmação por vezes não corresponde à verdade. Algumas aplicações na construção, tais como a incorporação de material plástico reciclado em betão ou asfalto, por exemplo, aumenta o impacto ambiental no fim de vida deste produto, devido à dificuldade em separar estes materiais, levando-os para aterro ao invés de recuperar os seus recursos.

Neste contexto e como prevenção da rutura da capacidade de produção e extração de recursos do planeta ao ponto dos danos serem irreversíveis, existe uma urgente necessidade e pressão para que ocorra a transição do setor da construção civil para um paradigma mais sustentável [1], sendo a implementação de uma Economia Circular (EC) o caminho mais correto a seguir [8], [11].

Os próximos passos para mudar a atual abordagem econômica da indústria da Construção exige o fecho de ciclos, a reutilização de resíduos e recursos, bem como o desacelerar do ciclo do material, desenvolvendo produtos duráveis com vários ciclos de reutilização [1]. Redução, reutilização e reciclagem são conceitos bem implementados em outros setores industriais, contudo a sua implementação na construção civil é recente e limitada à prevenção e gestão de resíduos, principalmente na reciclagem [1]. A reutilização de materiais e componentes é menos intensiva na produção de carbono e consumo de energia, quando comparada com a reciclagem, trazendo não apenas vantagens ambientais, mas também econômicas ao setor [11].

Assim sendo, a progressão da transição para uma EC pode ser aferida através de indicadores de circularidade [13], [14]. Alguns autores [15], [16] desenvolveram revisões focadas na reunião de indicadores de circularidade, concluindo que existem cerca de 30 microindicadores de circularidade relevantes na literatura para calcular a circularidade de um produto ou de uma empresa. No entanto, nem todos são relevantes para as aplicações de plásticos no sector da construção civil.

Kristensen and Mosgaard, no seu Artigo [15], analisa estes micro indicadores de circularidade e identifica quais são predominantes na mensuração de cada categoria de foco da EC. Categorias estas que emergiram de uma análise exaustiva da literatura, resultando em 9 diferentes categorias de foco da EC, sendo elas: Reutilização, Eficiência de Recursos, Desmontagem, Extensão da Vida

Útil, Gestão de Resíduos, Indicadores Multidimensionais, Gestão de Fim-de-vida, Remanufatura e Reciclagem.

Neste artigo, pretende-se identificar quais os microindicadores de circularidade mais relevantes para avaliar a circularidade de aplicações plásticas para o setor da construção civil, tendo como ponto de partida uma prévia caracterização [15]. Em seguida, pretende-se avaliar quais as direções e boas práticas que podem ser extraídas desses indicadores de circularidade para promover uma adoção mais efusiva da circularidade nas aplicações plásticas aplicadas na construção civil.

### **Plásticos no setor da construção civil**

Os plásticos trouxeram muitas propriedades vantajosas, que são essenciais para a construção de edifícios modernos, pois são um material leve em peso, durável em diferentes ambientes (boa resistência química e mecânica), com bom desempenho térmico e isolamento elétrico, resistente à humidade, e barato [4], [10]. Propriedades estas que levam ao setor da construção civil ser o segundo maior consumidor de plástico na Europa.

O PVC (policloreto de vinil) é o tipo de polímero mais usado na construção civil. Cerca de 69% da produção total de PVC é usada para aplicações de uso final de construção, sendo que 38% desta produção é usada para produzir tubagens (tubagens de drenagem, para aplicações de saneamento e ventilação, aplicações para águas superficiais e pluviais), e 20% é usado para produzir perfis de janelas. A produção remanescente é aplicada em chapas para pisos e telhados, tapumes, caleiros e condutas para cabos elétricos e telecomunicações, incluindo o revestimento e as calhas dos cabos [4].

Plásticos como EPS, XPS (Poliestireno expandido e extrudido, respetivamente), PU (poliuretano), e PIR (Poliisocianurato) são usados em aplicações plásticas para isolamento. O PE (polietileno) é usado em tubagens de drenagem, isolamentos elétricos, barreiras de humidade, e para impermeabilização de pisos, paredes e telhados. Para além disto, o PE está também presente nas embalagens que acondicionam os produtos e materiais da construção civil, e também em coberturas e lonas que protegem a construção e seus materiais da exposição às intempéries e à sujidade [4]. O PP (polipropileno) é aplicado na construção em produtos relacionados com o sistema HVAC (*Heating, Ventilating and Air Conditioning*), tubos de esgoto e drenos de piso. O ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno), PC (policarbonato) e PET (Polietileno tereftalato) estão presentes nos eletrodomésticos e itens de iluminação presentes no edifício [4].

Ainda que em pequenas quantidades, também diferentes tipos de resinas estão presentes em muitos produtos para a construção, tais como resinas fenólicas, epóxi, copolímeros fenol formaldeído-ureia, ureia-formaldeído, melamina-ureia formaldeído e acrílica. As aplicações de uso final mais comuns são lâ de rocha e vidro, para manter as fibras unidas, em painéis de fibra de média densidade (MDFs), painéis de partículas, laminados, colas, vernizes, ceras, tintas e lacas [4]. Os resumos da aplicação de plásticos em produtos de uso final aplicados na construção estão presentes na Tabela 1.

A participação de plásticos é muito alta nas peças elétricas e nos componentes do sistema HVAC, em contraste com as peças estruturais, onde a participação de plásticos é mínima [4].

As principais aplicações de plásticos que geraram resíduos no setor de construção e demolição são revestimentos de pisos e paredes (PVC), tubagens, condutas, materiais isolantes (PU) e perfis (PVC). A percentagem de resíduos plásticos no total de RCDs (resíduos de construção e demolição) recolhidos corresponde a 1%. A atual taxa de reciclagem mecânica é baixa (< 20%), e a maioria dos plásticos presentes nos RCDs vão para incineração ou aterro, uma vez que o plástico aplicado em edifícios tem uma longa vida útil e uma localização subterrânea acumulando lixo e impurezas, que dificultam o processo de reciclagem [4].

Para além disto, os tipos de polímeros utilizados na construção contêm frequentemente elevado teor de cargas como talco e calcário (acima de 20-30%), que lhes confere uma boa resistência à radiação UV, impactos mecânicos e maior resistência à abrasão. Contudo, condicionam as propriedades dos plásticos reciclados através do processo de reciclagem de RCDs.

Em 2018, 5 milhões de toneladas de resíduos plásticos foram reciclados na Europa, onde 4 milhões de toneladas voltaram a entrar na economia europeia para fabricar novos produtos. Cerca de 46% deste plástico reciclado é utilizado para a construção de novos edifícios e obras públicas, sendo este setor o maior consumidor de plástico reciclado na Europa [5].

Os plásticos reciclados são utilizados em diversas aplicações da construção civil, como base e sub-base de construção de estradas, componentes de asfalto, cargas em compósitos cimentícios e misturas asfálticas, substituição de madeira, painéis de portas, material isolante, paredes e tijolos [12].

Tabela 1: Aplicação de plásticos em Produtos destinados à construção civil (adaptado de Häkkinen, Kuittinen, and Vares 2019)

Aplicações da Construção Civil		Plastic type
Isolamento	Materiais de isolamento baseado em plásticos Materiais de isolamento de base mineral (lã de rocha e lã de vidro)	EPS, XPS, PU, PIR e PUR Resina copolímero de uréia-formaldeído fenólico e fenol
Sistemas de Saneamento e Irrigação	Tubagens, tubagens de drenagem, aplicações de águas superficiais e pluviais e condutas	PVC-U, PVC-P, PE e PP
Sistemas elétricos e de Telecomunicações	Condutas e revestimento de cabos	PVC-U e PVC-P
Janelas	Perfis de janelas, vidro, persianas, e outros perfis	PVC-U
Coberturas, Pisos e Telhado	Chapas para pisos e telhados, tapumes, caleiros Impermeabilização e revestimentos de pisos, paredes e telhados MDFs, aglomerados, pisos e laminados	PVC-U PE, Resinas de UF e MUF Ureia-formaldeído, Melamina-ureia formaldeído
Sistemas HVAC	Condutas de ventilação e de AC	PP
Iluminação e Aplicativos Domésticos	-	ABS, PC e PET
Revestimentos	Colas, vernizes, ceras Tintas e lacas	Resina acrílica e epóxi Copolímeros de Acrilato, Epóxi e PU

Embora essas aplicações sejam apelidadas de sustentáveis, circulares e ecologicamente corretas, nem todas o são. O uso desses plásticos reciclados em aplicações de construção pode criar um caminho para usar esses resíduos para aplicações de longo prazo em comparação com as de curto prazo, como reciclagem em novos produtos plásticos que têm um curto período de tempo [12], mas ao unir os materiais plásticos a outros materiais, como betão, asfalto, madeira, entre outros, os processos de separação e reciclagem no seu fim de vida tornar-se-ão difíceis, promovendo a sua incineração ou deposição em aterro. Consequentemente, essas aplicações apenas atrasam o tratamento desses resíduos em 50-70 anos, pois não fizeram mais do que consumir recursos plásticos, que antes poderiam ser reciclados, recuperando o seu recurso.

Para aplicar materiais plásticos em qualquer aplicação para fins na construção civil, sejam eles virgens ou reciclados, é muito importante seguir os princípios e estratégias da economia circular, pensar no seu tratamento em fim de vida, e não incorporar materiais reciclados apenas para obter uma melhoria das propriedades de um outro produto existente ou mesmo para consumir um resíduo.

### Micro-indicadores de circularidade relevantes para plásticos no sector da construção

A partir da compilação e categorização dos microindicadores de circularidade presentes na literatura realizada por [15], cada uma das 9 categorias de foco da EC e os microindicadores que as compõem foram revistos. Após esta revisão, identificamos quais os microindicadores de circularidade são os mais relevantes para avaliar a circularidade de produtos plásticos aplicados na construção civil. A extensa lista de referências de fontes com as definições dos microindicadores pode ser encontrada

na revisão acima mencionada [15], e foi revista e resumidos por nós neste artigo na Tabela 1 do Apêndice.

Considerando as categorias de foco da EC e o ciclo de vida dos produtos plásticos típicos aplicados ao setor da construção (tubos, laminados de pavimentos e coberturas, materiais isolantes, outros), apenas 6 categorias têm aplicação direta, nomeadamente a Reciclagem, Remanufatura, Gestão em fim-de-vida, Gestão de Resíduos, Eficiência de Recursos, e Indicadores Multidimensionais.

A categoria da desmontagem não se encaixa no setor da construção, pois a maioria dos produtos plásticos para construção não são projetados para serem montados no edifício, mas sim fixados com colas, resinas ou argamassas. Quando o edifício passa por uma reforma ou restauro, os produtos plásticos do edifício são destruídos para serem removidos. Caso o produto não seja destruído, este estará agregado aos materiais fixadores, que não são compatíveis com o material plástico, dificultando a sua reutilização e até mesmo comprometendo o processo de reciclagem. Por vezes estes produtos ficam expostos às intempéries e à sujidade, não cumprindo os requisitos necessários para serem reutilizados em novos edifícios ou em outras remodelações de edifícios. Consequentemente, a categoria de reutilização também foi rejeitada. A categoria extensão da vida útil também não se enquadra no setor da construção porque nos materiais plásticos aplicados na construção não há necessidade de prever múltiplos ciclos de reutilização, mas sim de dar mais atenção à gestão dos seus resíduos em fim de vida, uma vez que o ciclo de vida do edifício já é suficientemente longo (>50 anos).

Os esquemas representativos dos microindicadores de circularidade relevantes para produtos plásticos envolvidos na construção estão presentes na Figura 1.

Ao analisar individualmente cada micro-indicador, o Sustainability Indicators in CE (SICE)[17], Product Recovery Multi-criteria Decision Tool (PR-MCDT)[18] e End-of-use Product Value Recovery (EPVR)[19] foram rejeitados, porque esses microindicadores aferem a circularidade por meio dos custos dos processos de fim de vida, como a reutilização. Embora o edifício passe por alguns processos de remanufatura (como pintura, reparo ou reforma de componentes danificados) para permanecer em boas condições durante seu longo ciclo de vida, as aplicações plásticas envolvidas no edifício não costumam ser reformadas, recondicionadas ou reaproveitadas. Além disso, no final da vida útil do edifício, a casa é demolida e, consequentemente, os componentes plásticos não são recuperados. Pelo mesmo motivo se rejeitou a Decision Support Tool for Remanufacturing (DSTR)[20]. Tal como referimos anteriormente, é difícil separar os materiais plásticos dos restantes RCDs, devido à elevada contaminação com outros materiais orgânicos e minerais, sendo impossível re-circular estes produtos com o mesmo desempenho das aplicações plásticas originais. Também devido ao uso de fixadores do tipo metálico ou cimentício ou a utilização destes materiais plásticos com fibras minerais, papel ou outros materiais, torna-se difícil a separação destes materiais, acabando por ser incinerados ou depositados no aterro (e se fossem para reciclagem, o desempenho do plástico reciclado estará altamente comprometido). Assim sendo a Product-level Circularity Metric (PLCM)[21] e o Remanufacturing Product Profiles (REPRO2)[22] também foram rejeitados.

Indicadores que avaliam a circularidade através de parâmetros como as funcionalidades alcançadas com pouca mudança de configuração nos componentes do produto, também não se enquadram no setor de construção (como SICE), assim como indicadores que avaliam a circularidade através do ciclo fechado do produto, como a Circularity Calculator (CC)[23].

Por último, os Recycling Indices (RI)[24] e as Sustainable Design and End-of-life Options (SDEO)[25] também são rejeitados por apresentarem um nível de detalhe e complexidade muito elevado, evidenciando uma aparente impraticabilidade de aplicação no ambiente industrial comum, tornando seu cálculo inviável para avaliar a circularidade de uma aplicação plástica presente na construção civil.

Assim, os Microindicadores de circularidade mais relevantes para aferir a circularidade das aplicações plásticas da construção civil são Material Circularity Index (MCI)[26], Reuse Potential Indicator (RPI)[27], Value-based Resource Efficiency Indicator (VRE)[28], Model Expanded Zero

Waste Practice (EZWP)[29], Circularity Design Guidelines (CDG)[30] e Circular Economy Indicator Prototype (CEIP)[31]. Esses indicadores estão dentro das categorias de reciclagem, eficiência de recursos, gestão de resíduos e indicadores multidimensionais e são, na sua maioria, microindicadores ambientais ou econômicos. Além disso, o EZWP é tridimensional, pois envolve em sua metodologia de cálculo as três dimensões da sustentabilidade: social, ambiental e econômica[15].

Para além destes, existem outros indicadores que podem aferir a circularidade das aplicações plásticas da construção, contudo necessitam de uma avaliação prévia do produto a estudar, pois a informação necessária para o cálculo pode não estar disponível ou então não apresentarem correspondência com as etapas do ciclo de vida das comuns aplicações plásticas da construção. Estes microindicadores são o Recycling Disability Index (RDI)[32], Material Reutilization Score (MRS)[33], Circular Economy Index (CEI)[34], Combination Matrix (CM)[35], End-of-life Index (EOLI)[36], End-of-life Indices – Design Methodology (EOLI-DM)[37], Eco-cost and Value Creation (EVR)[38] e Typology for Quality Properties (TPQ)[39]. Como referido, antes da utilização destes microindicadores deve ser analisada a sua pertinência para o produto específico.

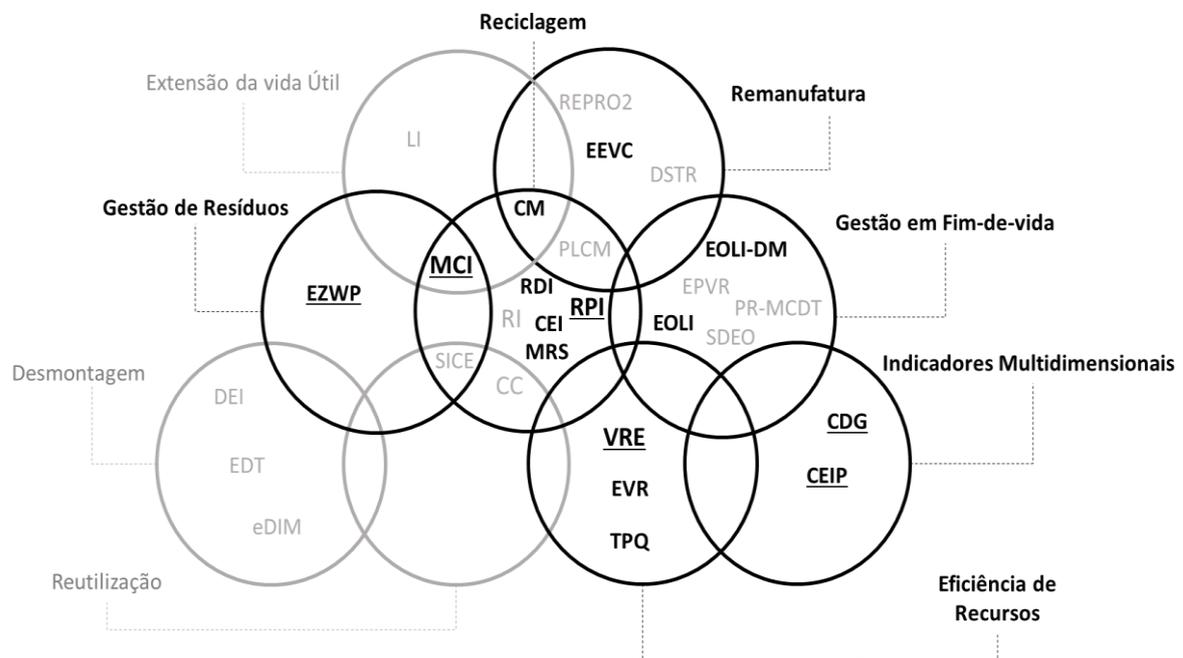


Figura 1: Microindicadores relevantes para estimar a circularidade dos produtos plásticos envolvidos na construção civil (os microindicadores em negrito e sublinhados são os mais relevantes, em preto são relevantes, e os em cinza não são relevantes para o setor de construção) (adaptado de [15])

O MCI avalia o fluxo de materiais envolvidos, considerando a quantidade de material reciclável, biodegradável e compostável no produto, quantidade de resíduos irre recuperáveis e eficiência do processo de reciclagem, relacionando-os com a utilidade e vida útil do produto. Nesta abordagem, um produto que é produzido apenas com matéria-prima virgem, que acaba sendo depositado em aterro após o seu uso é considerado um produto totalmente linear, ou seja,  $MCI=0$ . No entanto, se um produto não contém nenhuma matéria-prima virgem e foi recolhido para reciclagem de seus componentes, onde a eficiência de reciclagem é de 100%, é considerado um produto totalmente circular, ou seja,  $MCI=1$ [26].

O RPI é um indicador que avalia a semelhança do material de um produto a um recurso ou resíduo, após passar por um processo de tratamento de fim de vida. O RPI varia entre 0 e 1. Se  $RPI=0$ , significa que o material contém uma alta concentração de elementos poluentes cuja remoção será altamente dispendiosa ou ainda não estão disponíveis desenvolvimentos tecnológicos EOL capazes de proceder à separação dos materiais, sendo por esta razão mais semelhante a um resíduo. Se  $RPI=1$  o material pode ser recuperado pelas tecnologias de fim-de-vida existentes, sendo semelhante a um recurso[27].

O VRE considera o valor das entradas não sustentáveis para a economia em relação ao produto, como energia, matérias-primas, mão de obra, componentes semiacabados, entre outros. Para um VRE ideal, o produto utilizou recursos de fontes sustentáveis, como energia renovável, componentes reutilizados ou materiais reciclados, gerando emprego e alto valor agregado. Este indicador é ideal para avaliar se o setor da construção utiliza de forma sustentável os recursos plásticos[28].

O EZWP é um modelo que fornece indicadores potenciais para a monitorização do compromisso dos funcionários na resolução de práticas de desperdício zero. Este indicador inclui medidas específicas de impacto social e econômico e fornece diretrizes para as empresas avaliarem a responsabilidade social de seus colaboradores em relação à hierarquia de redução de resíduos e medir o impacto das estratégias de negócios circulares[29].

O nível de melhoria da circularidade para cada grupo de diretrizes é definido como o produto do grau de IM e do grau de relevância. Portanto, o nível de melhoria de circularidade calculado para um produto varia de 1 a 9 para cada grupo de diretrizes, que é posteriormente representado graficamente por um gráfico radar [30].

O CEIP é uma ferramenta holística, assim como o CDG, para avaliar o desempenho do produto em relação aos princípios da economia circular, por meio de um conjunto de 15 questões divididas em cinco etapas do ciclo de vida do produto, onde cada uma dessas questões recebe uma pontuação. Os resultados são apresentados de acordo com a soma das correspondências das pontuações das respostas positivas às questões anteriores, que indicam o limite de desempenho da circularidade do produto em estudo, sendo o limite máximo correspondente a 152 pontos[31].

## **Conclusão**

Para promover a implementação da EC no setor da construção em termos de aplicações de plástico, todas as fases da vida do imóvel devem ser repensadas. A maioria das decisões deve ser tomada na fase de desenvolvimento e design do produto, onde o designer deve escolher materiais plásticos seguros, não tóxicos e não escassos (promovendo sempre que possível o uso de materiais reciclados), verificar a necessidade de envolver mais de um tipo de material e avaliar a viabilidade de recuperação desse material por meio de tecnologias de gestão de resíduos existentes. No entanto, a utilização de material plástico reciclado misturado com outros materiais de construção (concreto ou argamassa, fibras sintéticas ou naturais), atuando apenas como carga ou matriz, não pode ser considerada uma solução circular ou sustentável, pois, no fim de vida da construção ou do edifício, os plásticos envolvidos não possuem alternativas para uma gestão sustentável dos seus resíduos - devido à dificuldade de separar os materiais plásticos destes materiais orgânicos e minerais - acabando por ser encaminhados para incineração ou no pior cenário para aterro. Este ato apenas impede a recuperação do plástico que outrora poderia ter sido recuperado, limitando a sua circularidade e a possibilidade de continuar a gerar valor econômico, promovendo a procura contínua por material plástico virgem.

Além disso, decisões como tipos de ligação e métodos construtivos empregados devem garantir que os resíduos e componentes sejam adequadamente geridos no seu fim de vida, assim como o local da obra, que deve ter espaço suficiente para possibilitar a desconstrução, para recuperar o máximo possível de componentes sem danos.

Outra fase do ciclo de vida de uma construção que merece atenção dos construtores é a gestão dos resíduos, sejam eles decorrentes da construção ou demolição do edifício. O atual sistema de gestão de RCDs deve ser reconfigurado para um sistema onde pensamentos como a redução, reutilização e reciclagem são altamente incutidos para todos os resíduos gerados, colocando a incineração ou o aterro como direções alternativas insustentáveis. A colaboração e coordenação entre arquitetos, engenheiros e comerciantes também são fundamentais para fechar o ciclo de materiais e proporcionar harmonia e sustentabilidade no setor da construção civil.

Posto isto, estamos certos de que o uso de microindicadores de circularidade pode auxiliar nas decisões a serem tomadas ao longo do processo de seleção de materiais, processos construtivos,

conectores e elementos construtivos, sejam as aplicações plásticas ou não, auxiliando o setor da construção na transição para uma economia circular e na construção de estruturas mais circulares.

No entanto, temos a noção que somente se conseguirá uma transição total e irreversível para uma EC se alguma coisa mudar a nível legislativo. Por exemplo, a criação de incentivos para construtores que utilizam materiais reciclados ou reutilizam resíduos ou que separam os resíduos no local da obra ou demolição.

## Agradecimentos

Apoio da Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) ao IPC pelos projetos UIDB/05256/2020 e UIDP/05256/2020, e a bolsa de Doutoramento UI/BD/150827/2021 (JM).

## Referências

- [1] M. Norouzi, M. Chàfer, L. F. Cabeza, L. Jiménez, and D. Boer, *Circular economy in the building and construction sector: A scientific evolution analysis*, J. Build. Eng., (2021) vol. 44.
- [2] A. González, C. Sendra, A. Herena, M. Rosquillas, and D. Vaz, *Methodology to assess the circularity in building construction and refurbishment activities*, Resour. Conserv. Recycl. Adv., vol. 12, (2021) 200051.
- [3] Ö. Çimen, *Construction and built environment in circular economy: A comprehensive literature review*, J. Clean. Prod., (2021) vol. 305.
- [4] T. Häkkinen, M. Kuittinen, and S. Vares, *Plastics in buildings*, 2019. [Online]. Available: <https://www.ym.fi/download/noname/%7B76B1ED3C-6D8D-4108-80D1-487F69957E45%7D/152008>. [Accessed:01-Feb-2022].
- [5] PlasticEurope, *Plastics – the Facts 2020*, 2020. [Online]. Available: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2021/>. [Accessed: 28-Feb-2022]
- [6] S. Mudgal *et al.*, *Plastic Waste in the Environment - Final Report.*, 2011. [Online]. Available: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/fd4f120a-bf98-403b-a22e-ca4d7b280da8>. [Accessed: 01-Mar-2022]
- [7] M. Sadat-Shojai and G. R. Bakhshandeh, *Recycling of PVC wastes*, Polym. Degrad. Stab., vol. 96, no. 4, (2011) 404–415.
- [8] B. Konstantinovas, N. V. Bento, and T. Sanches, *Economia Circular No Setor Da Construção Civil I- Ciclo dos Materiais*, 2019.
- [9] D. Briassoulis, M. Hiskakis, and E. Babou, *Technical specifications for mechanical recycling of agricultural plastic waste*, Waste Manag., vol. 33, no. 6, (2013) 1516–1530.
- [10] M. Liikanen *et al.*, *Construction and demolition waste as a raw material for wood polymer composites – Assessment of environmental impacts*, J. Clean. Prod., vol. 225, (2019) 716–727.
- [11] T. O’Grady, R. Minunno, H. Y. Chong, and G. M. Morrison, *Design for disassembly, deconstruction and resilience: A circular economy index for the built environment*, Resour. Conserv. Recycl., (2021) vol. 175.
- [12] P. O. Awoyera and A. Adesina, *Plastic wastes to construction products: Status, limitations and future perspective*, Case Stud. Constr. Mater., (2020) vol. 12.
- [13] G. Lonca, P. Lesage, G. Majeau-Bettez, S. Bernard, and M. Margni, *Assessing scaling effects of circular economy strategies: A case study on plastic bottle closed-loop recycling in the USA PET market*, Resour. Conserv. Recycl., vol. 162, no. May, (2020) 105013.
- [14] M. Saidani, B. Yannou, Y. Leroy, F. Cluzel, and A. Kendall, *A taxonomy of circular economy indicators*, J. Clean. Prod., vol. 207, no. October 2018, 542–559.

- [15] H. S. Kristensen and M. A. Mosgaard, *A review of micro level indicators for a circular economy – moving away from the three dimensions of sustainability?*, J. Clean. Prod., vol. 243, (2020) 118531.
- [16] A. De Pascale, R. Arbolino, K. Szopik-Depczyńska, M. Limosani, and G. Ioppolo, *A systematic review for measuring circular economy: The 61 indicators*, J. Clean. Prod., (2021) vol. 281.
- [17] J. Mesa, I. Esparragoza, and H. Maury, *Developing a set of sustainability indicators for product families based on the circular economy model*, J. Clean. Prod., vol. 196, (2018) 1429–1442.
- [18] Y. A. Alamerew and D. Brissaud, “Evaluation of Remanufacturing for Product Recovery: Multi-criteria Decision Tool for End-of-Life Selection Strategy,” *3rd Int. Conf. Remanufacturing*, 2017.
- [19] L. Cong, F. Zhao, and J. W. Sutherland, *Product Redesign for Improved Value Recovery via Disassembly Bottleneck Identification and Removal*, Procedia CIRP, vol. 61, (2017) 81–86.
- [20] P. van Loon and L. N. Van Wassenhove, *Assessing the economic and environmental impact of remanufacturing: a decision support tool for OEM suppliers*, Int. J. Prod. Res., vol. 56, no. 4, (2018) 1662–1674.
- [21] M. Linder, S. Sarasini, and P. van Loon, *A Metric for Quantifying Product-Level Circularity*, J. Ind. Ecol., vol. 21, no. 3, (2017) 545–558.
- [22] P. Zwolinski, M. A. Lopez-Ontiveros, and D. Brissaud, *Integrated design of remanufacturable products based on product profiles*, J. Clean. Prod., vol. 14, no. 15–16, (2006) 1333–1345.
- [23] IDEAL & CO Explore, *Circularity Calculator*, 2021. [Online]. Available: <http://www.circularitycalculator.com/>. [Accessed: 01-Feb-2021].
- [24] A. Van Schaik and M. A. Reuter, *Recycling indices visualizing the performance of the circular economy*, World Metall. - ERZMETALL, vol. 69, no. 4, (2016) 201–216.
- [25] M. Ameli, S. Mansour, and A. Ahmadi-javid, *Resources , Conservation & Recycling A simulation-optimization model for sustainable product design and efficient end-of-life management based on individual producer responsibility*, Resour. Conserv. Recycl., vol. 140, no. October 2018, 246–258.
- [26] Ellen MacArthur Foudation and ANSYS Granta, *Circularity Indicators - An Approach to Measuring Circularity - Methodology*, 1–64, 2019.
- [27] J. Y. Park and M. R. Chertow, *Establishing and testing the ‘reuse potential’ indicator for managing wastes as resources*, J. Environ. Manage., vol. 137, (2014) 45–53.
- [28] F. Di Maio, P. Carlo, K. Baldé, and M. Polder, *Resources , Conservation and Recycling Measuring resource efficiency and circular economy: A market value approach*, Resources, Conserv. Recycl., vol. 122, (2017) 163–171.
- [29] V. Veleva, G. Bodkin, and S. Todorova, *The need for better measurement and employee engagement to advance a circular economy: Lessons from Biogen’s ‘zero waste’ journey*, J. Clean. Prod., vol. 154, (2017) 517–529.
- [30] M. D. Bovea and V. Pérez-Belis, *Identifying design guidelines to meet the circular economy principles: A case study on electric and electronic equipment*, J. Environ. Manage., vol. 228, no. January, ( 2018) 483–494.
- [31] S. Cayzer, P. Griffiths, and V. Beghetto, *Design of indicators for measuring product performance in the circular economy*, Int. J. Sustain. Eng., vol. 10, no. 4–5, (2017) 289–298.
- [32] A. A. Mohamed Sultan, E. Lou, and P. Tarisai Mativenga, *What should be recycled: An integrated model for product recycling desirability*, J. Clean. Prod., vol. 154, (2017) 51–60.

- [33] CradletoCradle, *Version 3.1 cradle to cradle certified product standard*, 2016.
- [34] F. Di Maio and P. C. Rem, *A Robust Indicator for Promoting Circular Economy through Recycling*, *J. Environ. Prot. (Irvine., Calif.)*, vol. 6, no. 1, (2015) 1095–1104.
- [35] F. Figge, A. S. Thorpe, P. Givry, L. Canning, and E. Franklin-Johnson, *Longevity and Circularity as Indicators of Eco-Efficient Resource Use in the Circular Economy*, *Ecol. Econ.*, vol. 150, no. May, (2018) 297–306.
- [36] K. Y. Lee, Y. Aitomäki, L. A. Berglund, K. Oksman, and A. Bismarck, *On the use of nanocellulose as reinforcement in polymer matrix composites*, *Compos. Sci. Technol.*, vol. 105, (2014) 15–27.
- [37] C. Favi, M. Germani, A. Luzi, and M. Mandolini, *A design for EoL approach and metrics to favour closed-loop scenarios for products*, *Int. J. Sustain. Eng.*, (2017) vol. 7038.
- [38] J. Vogtlander, A. Mestre, A. Scheepens, and R. Wever, *Eco-efficient value creation, sustainable design and business strategies*, 2nd ed. Delft Academic Press / VSSD, 2014.
- [39] E. Lacovidou, A. P. M. Velenturf, and P. Purnell, *Science of the Total Environment Quality of resources : A typology for supporting transitions towards resource efficiency using the single-use plastic bottle as an example*, *Sci. Total Environ.*, vol. 647, (2019) 441–448.
- [40] P. Vanegas *et al.*, *Ease of disassembly of products to support circular economy strategies*, *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 135, no. June 2017, (2018) 323–334.
- [41] M. Mandolini, C. Favi, M. Germani, and M. Marconi, *Time-based disassembly method: how to assess the best disassembly sequence and time of target components in complex products*, 409–430, 2018.
- [42] E. Franklin-Johnson, F. Figge, and L. Canning, *Resource duration as a managerial indicator for Circular Economy performance*, *J. Clean. Prod.*, vol. 133, (2016) 589–598.
- [43] S. K. Das, P. Yedlarajiah, and R. Narendra, *An approach for estimating the end-of-life product disassembly effort and cost*, *Int. J. Prod. Res.*, vol. 38, no. 3, (2000) 657–673.

## Apêndice

Table 3: Overview of micro indicators present in study (adapted from: Kristensen e Mosgaard 2020).

Name	Description	Principle	Author
RDI	Recycling Desirability Index	Quão desejável é a reciclagem.	[32]
RPI	Reuse Potential Indicator	Quão semelhante um material recuperado é a um recurso ou resíduo.	[27]
CEI	Circular Economy Index	Valor econômico dos materiais de produtos em fim de vida.	[34]
MCI	Material Circularity Indicator	Grau de circularidade de um produto com base no fluxo de seus materiais.	[26]
MRS	Material Reutilization Score	Pontue o produto de acordo com sua fração de material reciclável.	[33]
EVR	Eco-cost /value Creation	Eficiência de recursos pela relação entre eco custos e o valor de um produto.	[38]
VRE	Value-Based Resource Efficiency	Eficiência de recursos baseada na massa e alinhada com as políticas ambientais/sociais/econômicas.	[28]
EDIM	Ease of Disassembly Metric	Tempo de desmontagem de um produto.	[40]
EDT	Effective Disassembly Time	Tempo efetivo para desmontar um produto para isolar um componente alvo.	[41]
LI	Longevity Indicator	Período em que um material é retido em um ciclo de produto.	[42]
PLCM	Product-level Circularity Metric	Com base no valor econômico de todas as peças como unidade básica e o produto é agregado em uma métrica circular.	[21]
CC	Circularity Calculator	Conteúdo reciclado de um produto.	[23]
EPVR	End-of-use product value recovery	Método com diferentes opções para gerenciar produtos em fim de uso.	[19]
SDEO	Sustainable design and end-of-life options	Desempenho de design sustentável de uma família de produtos em fim de uso.	[25]
PR-MCDT	Product Recovery Multi-criteria Decision Tool	Viabilidade de selecionar a remanufatura como opção para recuperar um produto em fim de uso.	[18]
REPRO2	Remanufacturing Product Profiles	Ferramenta que auxilia no design de produtos remanufaturados, com base em propostas de eco design.	[22]
TPQ	Typology for Quality Properties	Ferramenta de triagem da qualidade dos materiais/componentes de um produto, para melhorar a eficiência dos recursos	[39]
EZWP	Model of Expanded Zero Waste Practice	Ponto de partida para as empresas desenvolverem indicadores de gestão de resíduos (numa abordagem de desperdício zero).	[29]
CDG	Circularity Design Guidelines	Diretrizes de design para melhorar o design de produtos de uma perspectiva de economia circular.	[30]
DSTR	Decision Support Tool for Remanufacturing	Avalia se a remanufatura é um processo economicamente e ambientalmente viável.	[20]
RI	Recycling Indices	Define a taxa de reciclagem e recuperação de um produto e atribui uma categoria de eficiência à reciclagem.	[24]
SICE	Sustainability indicators in EC	Conjunto de 5 indicadores baseados na sustentabilidade e desempenho funcional de um produto.	[17]
CM	Combination Matrix	Contribui para o uso circular de recursos na empresa.	[35]
EOLI	End-of-life Index	Custos totais de cada processo de gerenciamento de produtos em fim de vida.	[36]
EOLI-DM	End-of-life Indices (Design Methodology)	Custos totais de cada processo de gestão de produtos em fim de vida com base em metodologias de eco design.	[37]
EEVC	Eco-efficient Value Creation	Baseado no EVR em um modelo para avaliar o potencial de remanufatura.	[38]
DEI	Disassembly Effort Index	Trabalho e processos necessários para desmontar um produto para fornecer uma pontuação para o produto.	[43]
CEIP	Circular Economy Indicator Prototype	Ferramenta que avalia o desempenho do produto no contexto da economia circular.	[31]

## **Caracterização mecânica de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado termoativado**

REAL Sofia<sup>1</sup>, AZEVEDO Bruno<sup>2</sup>, BOGAS José Alexandre<sup>1</sup>, CRUZ Ricardo<sup>1,a</sup>  
e CARRIÇO Ana<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1 1049-001 Lisboa

<sup>2</sup>Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1 1049-001 Lisboa

<sup>a</sup>arjtomacruz@gmail.com

**Palavras-chave:** Blocos de Terra Comprimida, Cimento Reciclado Termoativado, Caracterização Física, Caracterização Mecânica.

**Resumo.** A tendência atual de procura por materiais mais sustentáveis, reavivou o potencial de materiais de construção em terra. Por outro lado, dada necessidade de encontrar alternativas mais ecológicas aos atuais estabilizantes da terra, mais intensivos em carbono, como o cimento Portland (CP), têm-se procurado soluções alternativas de baixo carbono, como o cimento reciclado termoativado (CR). No presente estudo, pretende-se analisar o desenvolvimento de blocos de terra comprimidos (BTC) mais eco-eficientes, explorando a sua estabilização com a incorporação total ou parcial de CR em substituição de CP. Para tal, foram produzidos BTC com 5 a 10% de estabilizante e diferentes percentagens de incorporação de CR (20%, 50%, 100%) e caracterizados em termos de massa volúmica, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à flexão, módulo de elasticidade e velocidade de propagação de ultrassons. Em paralelo, foram também ensaiadas misturas de referência não estabilizadas ou estabilizadas com igual teor de CP. Os BTC foram ensaiados tendo em consideração diferentes condições de cura e de humidade, de modo a avaliar a eficiência das soluções estabilizantes preconizadas. Apesar de se verificar uma redução esperada das propriedades mecânicas face aos BTC com CP, verifica-se uma melhoria significativa face aos BTC não estabilizados, nomeadamente em condições de adversas de humidade. Assim, demonstra-se a viabilidade da produção de BTC estabilizados com CR, atingindo soluções mais sustentáveis.

### **Introdução**

A mais recente procura por materiais e técnicas de construção mais sustentáveis, reavivou o interesse pela construção em terra. Além do seu baixo impacto ambiental e energia incorporada, algumas das suas principais vantagens são a existência de matéria-prima em abundância, a sua reciclabilidade e as suas características higrotérmicas. Adicionalmente, o aparecimento da estabilização com materiais cimentícios proporcionou uma melhoria relevante das propriedades de diferentes técnicas de construção em terra, dos quais se destacam-se os blocos de terra comprimida (BTC).

Por outro lado, dada a necessidade de encontrar alternativas mais ecológicas aos atuais estabilizantes da terra, mais intensivos em carbono, como o cimento Portland (CP), têm-se procurado soluções alternativas de baixo carbono, como o cimento reciclado termoativado (CR). Para além de reduzir o consumo de recursos naturais e as emissões de CO<sub>2</sub> durante a fase de produção, este novo material eco-eficiente permite a reciclagem de resíduos de construção e demolição. Com base em estudos anteriores em outros materiais de construção [1–4], o cimento reciclado termoativado poderá ser uma opção de estabilizante mais sustentável do ponto de vista ecológico, enquanto tecnicamente viável.

No presente estudo, pretende-se analisar o desenvolvimento de blocos de terra comprimidos (BTC) mais eco-eficientes, explorando a sua estabilização com a incorporação total ou parcial de

CR em substituição de CP. Para tal, foram produzidos BTC com 5 a 10% de estabilizante e diferentes percentagens de incorporação de CR (20%, 50%, 100%) e caracterizados em termos de massa volúmica, resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, resistência à flexão, módulo de elasticidade e velocidade de propagação de ultrassons. Em paralelo, foram também ensaiadas misturas de referência não estabilizadas ou estabilizadas com igual teor de PC. Os BTC foram ensaiados tendo em consideração diferentes condições de cura e de humidade, de modo a avaliar a eficiência das soluções estabilizantes preconizadas.

## Programa experimental

**Materiais.** Para a produção dos BTC, foram selecionados os seguintes materiais: um tipo de terra proveniente de Montemor-o-Novo, cimento CEM I 42,5 R da SECIL e CR produzido em laboratório. A terra foi caracterizada através da sua massa volúmica (NP 83 [5]), granulometria (LNEC E 293 [6]), limites de Atterberg (NP 143 [7]), teor ótimo de água (TOA) (ASTM D698 [8]) e teor de matéria orgânica. A terra é composta por cerca de 20,1% de seixo fino, 48,4% de areia e 31,5% de material fino, com um teor de matéria orgânica inferior a 1% e uma massa volúmica de cerca de 2,85 g/cm<sup>3</sup>. Esta apresentou um teor ótimo de água de 16% e limites de liquidez e de plasticidade de 30% e 22%, respetivamente, correspondendo a um índice de plasticidade de 8%. Antes da produção dos BTC, a terra foi seca ao ar, pulverizada e peneirada (1mm).

O CR foi produzido a partir de pasta de cimento (CEM I 42,5R) com uma relação água/cimento (a/c) de 0,45 e uma resistência à compressão aos 28 dias de 57 MPa. Após mais de 3 meses em ambiente de laboratório, a pasta foi submetida a processos de britagem e moagem, de forma a reduzir a dimensão das partículas até menos de 250 µm. De seguida, estas partículas foram submetidas a um tratamento térmico em forno rotativo, tendo sido aquecidas a 10°C/min até 650°C, com um período de residência de 3 horas, seguido de arrefecimento dentro do forno até temperatura ambiente. A caracterização dos estabilizantes encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1: Propriedades dos estabilizantes

Parâmetro	Norma	Designação	
		CEM I 42,5 R	CR
Massa volúmica (g/cm <sup>3</sup> )		3,07 <sup>a)</sup>	3,00 <sup>b)</sup>
SiO <sub>2</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO <sub>3</sub> (%)		19,64+5,34+3,05	19,14+5,13+3,00
CaO+MgO (%)		62,80+1,80	60,79+1,77
CaO livre (%)		0,7	13,94
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	NP EN 196-1 [9]	57,0	17,3
Consistência normal (a/l)	NP EN 196-3 [10]	0,31	0,73
Tempo de presa inicial/final (mins)	NP EN 196-3 [10]	170/280	290/385

<sup>a)</sup> De acordo com LNEC E 64 [11]; <sup>b)</sup> de acordo com picnómetro de hélio

**Composição e produção das misturas.** Os BTC foram produzidos manualmente com uma dimensão de 220x105x60 mm com recurso a uma prensa *Terstaram* e uma força de compactação de cerca de 150kN. Foram selecionadas 7 composições, designadas consoante o tipo (CP e CR) e percentagem (5-10%) de estabilizante usado (Tabela 2). Após a produção, os BTC estabilizados com CP ou CR foram sujeitos a 7 dias de cura húmida, enquanto os BTC não estabilizados (NE) foram submetidos a cura seca (7 dias sob película).

Tabela 2: Composição dos blocos de terra comprimida

Composição	Terra (%)	CP (%)	CR (%)	a/l	TOA (%)
CP10	90	10	-	1,10	15,0
CR10	90	-	10	1,25	16,5
CP5	95	5	-	2,20	15,2
CR5	95	-	5	2,20	15,2
CR2CP8	90	8	2	1,10	15,0
CR5CP5	90	5	5	1,15	15,5
NE	100	-	-	-	14,4

**Preparação dos blocos e métodos de ensaio.** Os BTC foram caracterizados segundo a sua massa volúmica (NP EN 772-13 [12]), resistência à compressão (NP EN 772-1 [13], NBR 8492 [14]), resistência à tração por flexão (NP EN 772-6 [15]), resistência à tração por compressão diametral (NP EN 12390-6 [16]), módulo de elasticidade (LNEC E397 [17]) e velocidade de propagação de ultrassons (NP EN 12504-4 [18]). Os ensaios de resistência mecânica foram realizados com recurso a uma prensa hidráulica *Tonipact* com uma capacidade de 3000kN e células de carga com capacidades de 100kN e 200kN. Para o ensaio de resistência à compressão, cada provete foi seccionado em duas partes. De seguida, as duas partes do bloco foram sobrepostas sem aplicação de argamassa e ensaiadas a uma velocidade constante de 0,5 kN/s. Os ensaios foram realizados a diferentes idades (3,7 e 28 dias) em provetes com várias condições de humidade (seco, saturado, em ambiente de laboratório (19-26°C e 55-75%HR)). A resistência à tração por flexão foi determinada com base no ensaio de flexão a três pontos a uma velocidade constante de 0,1 kN/s. Da mesma forma, o ensaio de resistência à tração por compressão diametral foi realizado a uma velocidade constante de 0,1 kN/s. Estes ensaios foram realizados aos 28 dias em provetes em ambiente de laboratório. O ensaio de velocidade de propagação de ultrassons foi realizado aos 28 dias em provetes com diferentes condições de humidade.

### Análise e discussão

A Tabela 3 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física e mecânicas dos BTC em estudo, bem como o seu coeficiente de variação (CV). Foram avaliadas a massa volúmica fresca ( $MV_f$ ), a massa volúmica seca ( $MV_{seco}$ ), a massa volúmica em ambiente laboratorial ( $MV_{AL}$ ), a massa volúmica saturada ( $MV_{sat}$ ), a resistência à compressão aos 3, 7 e 28 dias ( $f_c$ ), a resistência à tração por flexão aos 28 dias ( $f_{ctr}$ ), a resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias ( $f_{ctsp}$ ), o módulo de elasticidade ( $E_c$ ) e a velocidade de propagação de sons (VUS). A porosidade total (PT) foi estimada tendo como base a massa volúmica fresca.

Tabela 3: Resultados da caracterização física e mecânica

Propriedades	CP10	CR10	CP5	CR5	CR2CP8	CR5CP5	T
$MV_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	1990	1870	1950	1880	1950	1870	2030
PT (%)	36,4	41,0	39,2	41,7	37,5	40,2	37,9
$MV_{AL}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1860	1730	1780	1720	1800	1780	1820
$MV_{seco}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1730	1630	-	-	1690	1650	1790
$MV_{sat}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2080	1910	-	-	1970	1950	-
$f_{c,3d AL}$ (MPa)	3,38	1,77	1,47	0,97	2,61	2,01	0,83
CV $_{f_{c,3d AL}}$ (%)	15	3	15	8	5	19	14
$f_{c,7d AL}$ (MPa)	3,54	2,52	1,82	1,05	3,14	2,51	1,79
CV $_{f_{c,7d AL}}$ (%)	11	3	6	7	6	21	2
$f_{c,28d AL}$ (MPa)	5,92	4,44	3,34	2,45	5,12	4,99	2,33
$f_{c,28d seco}$ (MPa)	7,43	6,53	-	-	-	-	4,25
$f_{c,28d sat}$ (MPa)	4,32	2,45	-	-	-	-	-
CV $_{f_{c,28d AL}}$ (%)	8	5	9	5	6	2	8
CV $_{f_{c,28d seco}}$ (%)	34	15	-	-	-	-	8
CV $_{f_{c,28d sat}}$ (%)	21	4	-	-	-	-	-
$f_{ctr,28d AL}$ (MPa)	0,97	0,93	0,69	0,52	1,02	1,17	0,41
CV $_{f_{ctr,28d AL}}$ (%)	9	15	7	13	3	6	12
$f_{ctsp,28d AL}$ (MPa)	0,51	0,44	0,36	0,20	0,44	0,56	0,25
$f_{ctsp,28d sat}$ (MPa)	0,45	0,33	-	-	-	-	-
CV $_{f_{ctsp,28d AL}}$ (%)	14	12	11	12	7	5	20
CV $_{f_{ctsp,28d sat}}$ (%)	25	33	-	-	-	-	-
$E_{c,28d AL}$ (GPa)	2,77	2,10	-	-	-	-	-
VUS $_{AL}$ (m/s)	1741	1414	1147	1094	1584	1472	1104
VUS $_{seco}$ (m/s)	1247	1307	-	-	-	-	1338
VUS $_{sat}$ (m/s)	2069	1934	-	-	-	-	-

**Propriedades no estado fresco.** O TOA das misturas variou entre 14,4 e 16,5%, tendo sido superior ao recomendado por Rigassi [19]. O elevada exigência de água do CR, associada ao TOA da terra maior do que o usual, justifica os resultados elevados (Tabela 2). Como consequência destes valores, as relações a/l dos BTC com CR/CP variaram entre 1,10 e 2,20 (Tabela 2), tendo sido superiores quando o CR foi usado com estabilizante.

A massa volúmica fresca ( $MV_f$ ) dos BTC variou entre 1870 e 2030  $kg/m^3$  (Tabela 3), encontrando-se dentro dos valores recomendados por Rigassi [19]. Apesar de a massa volúmica dos estabilizantes utilizados ser superior à da terra, o maior TOA dos BTC estabilizados terá compensado este aspeto, pelo que os BTC NE e BTC CR apresentaram a maior e menor massa volúmica fresca, respetivamente.

Com base na massa volúmica fresca dos BTC, estimou-se a sua porosidade total (PT) (Tabela 3), correspondendo à soma do volume de ar e do de água que não consumida durante a hidratação do estabilizante. Esta variou entre 36,4 e 41,7%, tendo sido superior nos BTC CR, demonstrando a sua menor compactidade

**Massa volúmica no estado endurecido.** A Figura 1 apresenta a massa volúmica no estado endurecido dos BTC com diferentes tipos e percentagens de estabilizante em diferentes condições de humidade. Conforme seria espectável, a massa volúmica aumentou com a humidade dos BTC. A massa volúmica seca dos BTC variou entre 1630 e 1790  $kg/m^3$  (Tabela 3).

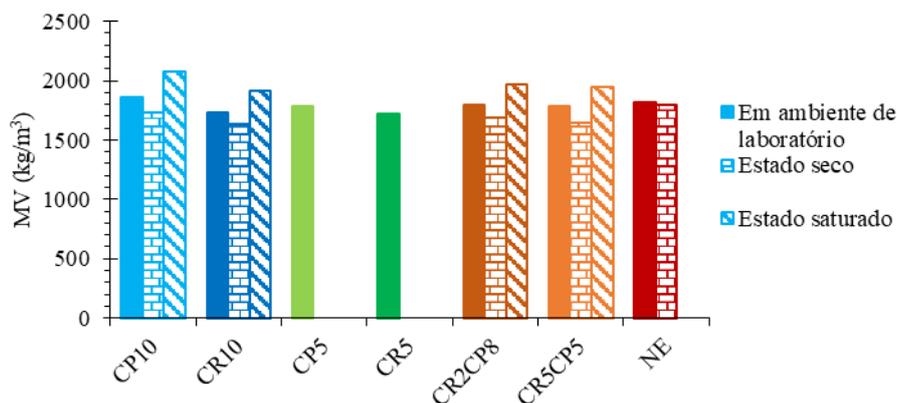


Figura 1: Massa volúmica (MV) em diferentes condições de humidade

À semelhança da massa volúmica fresca, os BTC CR apresentaram as menores massas volúmica secas, essencialmente devido ao elevado a/l destes BTC. No entanto, destaca-se o facto de a diferença entre a massa volúmica fresca e a seca ter sido ligeiramente inferior nos BTC CR do que nos BTC CP, o que sugere que os BTC CP terão consumido maior quantidade de água de hidratação. De facto, o CR tende a desenvolver menor quantidade de produtos de hidratação ao longo do tempo [20,21].

A massa volúmica saturada dos BTC estabilizados foi cerca de 16,8-20,1% superior à seca. No entanto, não foi possível determinar a massa volúmica saturada do BTC NE, dado que perdeu a sua coesão em contacto com a água, demonstrando o potencial da utilização de estabilizantes nas propriedades dos BTC.

**Resistência à compressão.** As Figuras 2 e 3 apresentam a resistência à compressão de BTC com diferentes tipos e percentagens de estabilizante aos 28 dias para várias condições de humidade e em ambiente de laboratório a diferentes idades, respetivamente. A resistência à compressão dos BTC em ambiente de laboratório variou entre 0,83 e 5,92 MPa, dependendo da sua composição e idade (Figura 2 e Tabela 3). Esta propriedade foi até 154 % superior nos BTC estabilizados do que no BTC NE em ambiente de laboratório, tendo aumentado com a percentagem de estabilizante. Estes resultados demonstram o contributo dos estabilizantes para o comportamento mecânico dos BTC. No entanto, a incorporação de apenas 5% de estabilizante nos BTC teve pouca influência na resistência à compressão, em especial no caso dos BTC CR, tendo sido apenas até 5% superior.

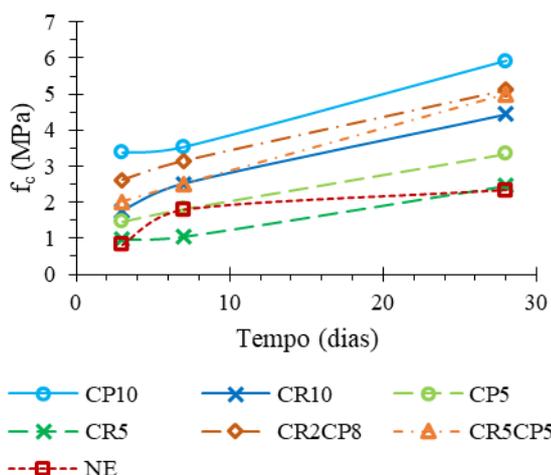


Figura 2: Resistência à compressão ( $f_c$ ) ao longo do tempo em ambiente de laboratório

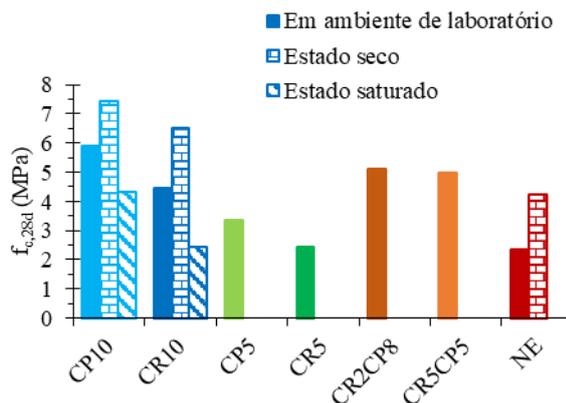


Figura 3: Resistência à compressão aos 28 dias ( $f_{c,28d}$ ) em diferentes condições de humidade

Exceto o BTC NE, a resistência à compressão dos BTC estabilizados aumentou ao longo do tempo, associado ao desenvolvimento de produtos de hidratação por parte do estabilizante, promovendo a coesão entre as partículas de terra. A resistência à compressão aos 28 dias em ambiente de laboratório dos BTC CR foi apenas cerca de 25% inferior à dos BTC CP, independentemente da percentagem de incorporação, essencialmente devido à sua maior relação a/l, e consequente, maior porosidade total, bem como o facto de, aos 28 dias, o CR tender a apresentar menor quantidade de produtos de hidratação do que o CP [20]. Contrariamente ao que seria expectável, essa diferença foi superior em idades iniciais. De facto, vários autores [20,22] referem que em idades jovens, o CR tende a apresentar melhor desempenho do que o CP associado à maior reatividade do polimorfo de  $C_2S$  presente no CR. O facto de a terra se encontrar mais húmida em idades iniciais poderá justificar os resultados.

A resistência à compressão aos 28 dias variou entre 2,33 e 7,43 MPa, dependendo da composição dos BTC e das condições de cura (Figura 3 e Tabela 3). Conforme seria expectável, esta propriedade mecânica diminuiu com o aumento da humidade dos BTC, tendo sido até 2,7 vezes inferior no estado saturado do que no seco. Tal deve-se ao desenvolvimento de pressões de água nos poros e liquefação da porção não estabilizada das partículas de solo argiloso [23,24]. Independentemente das condições de humidade, a utilização de estabilizante resultou numa melhoria significativa da resistência à compressão dos BTC. Destaca-se ainda o facto de a diferença entre a resistência à compressão aos 28 dias dos BTC CP e os BTC CR com a mesma quantidade de estabilizante ter aumentado com a humidade dos BTC, tendo variado entre 12 e 43%, o que demonstra a maior sensibilidade dos BTC CR às condições de humidade.

A Figura 4 apresenta a eficiência estrutural aos 28 dias dos BTC em diferentes condições de humidade. Conforme seria expectável, a eficiência estrutural foi até 2 vezes superior em BTC no estado seco do que para as restantes condições de humidade, devido à redução da massa volúmica e ao aumento da resistência à compressão. Tal demonstra a sensibilidade dos BTC às condições de humidade. Por outro lado, a incorporação de estabilizante, influenciou significativamente a eficiência estrutural, tendo-se obtido eficiências estruturais até cerca de 2 vezes superior dos que nos BTC NE.

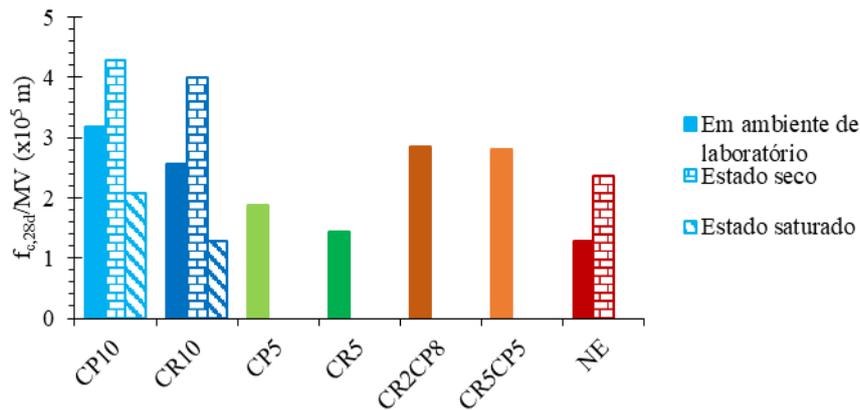


Figura 4: Eficiência estrutural aos 28 dias ( $f_{c,28d}/MV$ ) em diferentes condições de humidade

**Resistência à tração.** As Figuras 5 e 6 mostram a resistência à tração por compressão diametral e por flexão aos 28 dias dos BTC produzidos. Dependendo do tipo e percentagem de estabilizante e das condições de humidade, as resistências à tração por compressão diametral e por flexão variaram entre 0,25-0,56 e 0,41-1,17 MPa (Tabela 3), respetivamente. Estes ensaios apresentaram coeficientes de variação relevantes, facto que associado aos reduzidos valores obtidos para estas propriedades, dificultou a análise de resultados. A resistência à tração por flexão dos BTC foi cerca de 2 vezes superior à por compressão diametral. Tal deve-se ao facto de a resistência à tração por flexão beneficiar do efeito de uma maior plasticidade e redistribuição de tensões na região tracionada [25].

À semelhança da resistência à compressão, a percentagem de estabilizante influenciou mais a resistência à tração do que o tipo de estabilizante. De facto, para uma percentagem de estabilizante de 10%, a diferença entre a resistência à tração por flexão dos BTC CP e CR foi inferior a 15%. Por outro lado, à semelhança da resistência à compressão, a diferença entre a resistência à tração por compressão diametral no estado saturado dos BTC CR e CP foi superior à diferença observada em ensaios em condições de humidade inferiores.

Em relação ao BTC NE, a incorporação de 5% de estabilizante foi pouco eficiente na melhoria da resistência à tração dos BTC, em especial no caso do CR. No entanto, para 10% CR, a resistência à tração por compressão diametral e por flexão atingiram valores cerca de 2,3 e 1,8 vezes superiores ao BTC NE, respetivamente.

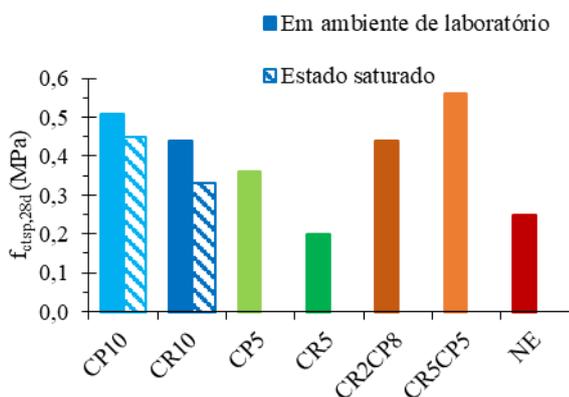


Figura 5: Resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias ( $f_{ctsp,28d}$ ) em diferentes condições de humidade

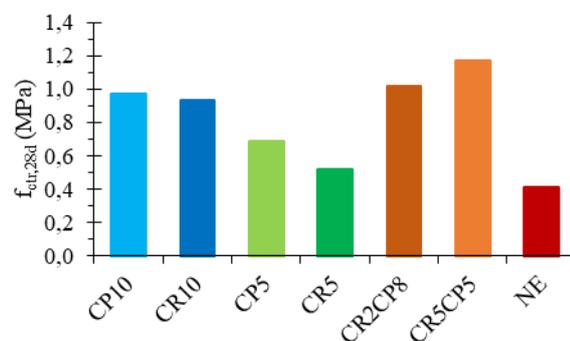


Figura 6: Resistência à tração por flexão aos 28 dias ( $f_{ctr,28d}$ ) em ambiente de laboratório

**Módulo de elasticidade.** O módulo de elasticidade foi determinado apenas para os BTC CP10 e CR10, tendo-se obtido 2,77 e 2,10 GPa (Tabela 3), respetivamente. A reduzida rigidez destes BTC deve-se essencialmente à elevada porosidade e fraca consolidação das partículas de terra. O módulo de elasticidade do BTC CP foi cerca de 32% superior ao do BTC CR, dada a sua menor porosidade total e maior resistência mecânica. A menor rigidez do BTC CR encontra-se demonstrada na Figura 7, onde é apresentada relação entre a tensão e a deformação dos provetes ensaiados.

**Velocidade de propagação de sons.** A Figura 8 apresenta a velocidade de propagação de ultrassons aos 28 dias dos BTC em diferentes condições de humidade. A velocidade de propagação de ultrassons variou entre 1104 e 2069 m/s, dependendo da composição e das condições de humidade dos BTC (Tabela 3). À semelhança das outras propriedades, a velocidade de propagação de ultrassons foi mais influenciada pelas condições de humidade do que pelo tipo de estabilizante. Esta propriedade foi até cerca de 1,7 vezes superior em BTC no estado saturado do que no estado seco.

A velocidade de propagação de ultrassons decresceu com a percentagem de incorporação de estabilizante, devido à redução de porosidade nestes BTC. Da mesma forma, os BTC CR apresentaram velocidades de propagação de ultrassons cerca de 5 a 17% inferiores aos BTC CP com a mesma percentagem de incorporação.

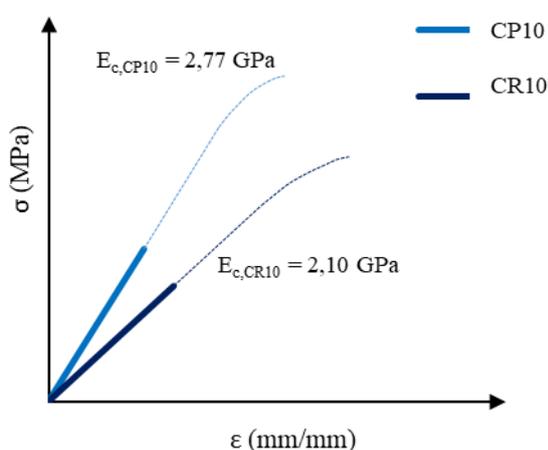


Figura 7: Relação tensão-deformação dos BTC CP10 e CR10

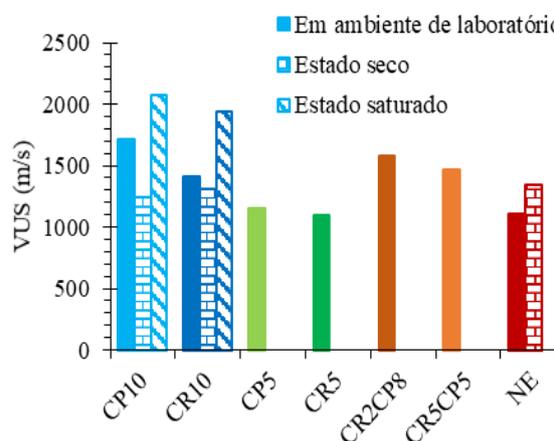


Figura 8: Velocidade de propagação de ultrassons aos 28 dias (VUS) em diferentes condições de humidade

## Conclusão

No presente estudo, analisou-se o comportamento mecânico de BTC mais eco-eficientes, estabilizados com CR. Em geral, a incorporação de CR originou uma melhor resistência mecânica dos BTC até cerca de 2 vezes em relação ao BTC NE. No entanto, esta foi inferior à obtida nos BTC CP com igual percentagem de incorporação de estabilizante. A maior exigência de água do CR e a menor compactação dos BTC CR contribuiu o menor desempenho em relação aos BTC CP. As condições de humidade influenciaram as propriedades dos BTC de forma mais relevante do que o tipo de estabilizante. No entanto, os BTC CR foram mais sensíveis às condições de humidade do que os BTC CP. Apesar disto, e ao contrário dos BTC NE, a incorporação de estabilizante permitiu aos BTC manter a integridade física em condições saturadas.

Em suma, apesar de se verificar uma redução esperada das propriedades mecânicas face aos BTC CP, verifica-se uma melhoria significativa face aos BTC NE, nomeadamente em condições adversas de humidade. Assim, demonstra-se a viabilidade da produção de BTC CR, atingindo soluções mais sustentáveis.

## Agradecimentos

O presente trabalho de investigação foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), através do projeto PTDC/ECI-CON/0704/2021. Os autores agradecem ainda o apoio do CERIS/IST através do projeto UIDB/ECI/04625/2020 e a colaboração das Oficinas do convento, Montemor e SECIL pelo fornecimento dos materiais utilizados durante a campanha experimental.

## Referências

- [1] A. Carriço, S. Real, J. Bogas, M. Pereira, *Mortars with thermoactivated recycled cement: fresh and mechanical characterisation*, *Constr. Build. Mater.* 256 (2020) 119502.
- [2] S. Real, J. Bogas, A. Carriço, S. Hu, *Mechanical characterisation and shrinkage of thermoactivated recycled cement concrete*, *Appl. Sci.* 11 (2021) 2454. <https://doi.org/10.3390/app11062454>.
- [3] A. Carriço, S. Real, J. Bogas, *Durability performance of thermoactivated recycled cement concrete*, *Cem. Concr. Compos.* 124 (2021) 104270. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104270>.
- [4] A. Carriço, J. Bogas, S. Real, M. Pereira, *Shrinkage and sorptivity of mortars with thermoactivated recycled cement*, *Constr. Build. Mater.* 333 (2022) 127392. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127392>.
- [5] NP 83, Solos. Determinação da densidade das partículas, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 1965.
- [6] E 293, Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida., Especificação LNEC. Laboratório nacional de engenharia civil (LNEC), 1970.
- [7] NP 143, Solos. Determinação dos limites de consistência, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 1969.
- [8] ASTM D698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lbf/ft<sup>3</sup> (600 kN-m/m<sup>3</sup>)), American Society for Testing & Materials (ASTM), 2021.
- [9] NP EN 196-1, Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2006.
- [10] NP EN 196-3, Métodos de ensaio de cimentos. Parte 3: Determinação do tempo de presa e da expansibilidade, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2017.
- [11] E 64, Cimentos. Determinação da massa volúmica, Especificação LNEC. Laboratório nacional de engenharia civil (LNEC), 1979.
- [12] NP EN 772-13, Métodos de ensaio de blocos para alvenaria. Parte 13: Determinação da massa volúmica real seca e da massa volúmica aparente seca de blocos para alvenaria (excepto blocos de pedra natural), Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2002.
- [13] NP EN 772-1, Métodos de ensaio de blocos para alvenaria. Parte 1: Determinação da resistência à compressão, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2002.
- [14] NBR 8492, Tijolo maciço de solo-cimento. Determinação da resistência à compressão e da absorção d'água, Associação brasileira de normas técnicas (ABNT), 1984.
- [15] NP EN 772-6, Métodos de ensaio de blocos para alvenaria. Parte 6: Determinação da resistência à tracção por flexão de blocos para alvenaria de betão de agregados, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2002.

- [16] NP EN 12390-6, Ensaios do betão endurecido. Parte 6: Resistência à tracção por compressão de provetes de ensaio, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2003.
- [17] E 397, Betões. Determinação do módulo de elasticidade em compressão, Especificação LNEC. Laboratório nacional de engenharia civil (LNEC), 1993.
- [18] NP EN 12504-4, Ensaios de betão nas estruturas. Determinação da velocidade de propagação de ultra-sons, Instituto Português da Qualidade (IPQ), 2007.
- [19] V. Rigassi, *Compressed earth blocks: Manual of production*, Vol. I. Eschborn, Germany: CRAterre-EAG, 1985.
- [20] J. Bogas, S. Real, A. Carriço, J. Abrantes, M. Guedes, *Hydration and phase development of recycled cement*, *Cem. Concr. Compos.* 127 (2022) 104405. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104405>.
- [21] J. Bogas, A. Carriço, A. Tenza-Abril, *Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes*, *Cem. Concr. Res.* 138 (2020) 106226. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106226>.
- [22] Z. Shui, D. Xuan, W. Chen, R. Yu, R. Zhang, *Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures*, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 531–537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016>.
- [23] P. Walker, *Strength, Durability and Shrinkage Characteristics of Cement Stabilised Soil Blocks*, *Cem. Concr. Compos.* 17 (1995) 301–310.
- [24] F. Riza, I. Rahman, *The properties of compressed earth-based (CEB) masonry blocks*, In *Eco-Efficient Masonry Bricks and Blocks, Design, Properties and Durability*. Edited by Fernando Pacheco-Torgal, P. B. Lourenço, J. A. Labrincha, P. Chindaprisirt and S Kumar, 2015.
- [25] J. Bogas, *Caracterização de betões estruturais com agregados leves de argila expandida*, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2011.

## Resistência à água de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento reciclado termoativado

CRUZ Ricardo<sup>1,a</sup>, AZVEDO Bruno<sup>2</sup>, BOGAS José Alexandre<sup>1</sup>, e REAL Sofia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1 1049-001 Lisboa

<sup>2</sup>Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Av. Rovisco Pais, 1 1049-001 Lisboa

<sup>a</sup>rrjtomacruz@gmail.com

**Palavras-chave:** Blocos de Terra Comprimido; Estabilização; Cimento Reciclado; Resistência à Água; Sustentabilidade.

**Resumo.** A necessidade de uma construção mais sustentável, assente em materiais de menor energia incorporada, faz com que ressurgira o interesse na construção em terra. Os blocos de terra comprimida (BTC) são uma alternativa promissora, dado que permitem uma maior velocidade de processamento, menor variabilidade e maior resistência mecânica face a outras tecnologias de construção em terra. No entanto, a resistência à água é um dos maiores problemas dos BTC, sendo necessário proceder à sua estabilização. O cimento Portland (CP) é o estabilizante mais eficaz e mais utilizado, mas a sua incorporação na construção em terra é incompatível com a sua natureza ecológica e sustentável. Nesse sentido, no presente trabalho considerou-se a utilização alternativa de cimento reciclado (CR) de baixo carbono, obtido a partir da termoactivação de resíduos de materiais cimentícios, para estabilização dos BTC. Foram consideradas 7 composições, incluindo 3 misturas de referência (não estabilizada, e estabilizada com 5% ou 10% de CP, em massa), e BTCs com 20% 50% e 100% CR em substituição de CP, para 5% e 10% de ligante total. Os BTC foram caracterizados em termos da sua resistência à água, tendo em consideração ensaios de absorção por imersão, absorção capilar e de erosão acelerada por jato de água. Face aos BTC estabilizados com CP, a incorporação de CR reduziu a resistência à água. Porém, a estabilização dos BTC com CR foi adequada, conduzindo a uma melhoria significativa face aos BTC não estabilizados. Os BTC apresentaram elevada resistência à erosão acelerada, independentemente da composição do ligante.

### Introdução

Após a revolução industrial, a construção em Terra foi progressivamente substituída por outros materiais e técnicas de construção [1]. No entanto, mais recentemente, a falta de materiais e de técnicas de construção mais sustentáveis tem conduzido a um ressurgimento no seu interesse. Os principais pontos a favor da construção em Terra residem, principalmente, no facto de possuir um baixo impacto ambiental, reduzido custo, baixa energia incorporada e uma elevada disponibilidade da matéria-prima [2]. Porém, a elevada suscetibilidade à água da construção em Terra reduz significativamente as suas propriedades físicas e mecânicas e a sua durabilidade [3]. Os blocos de terra comprimida (BTC) quimicamente estabilizados assumem uma abordagem eficiente para mitigar a elevada suscetibilidade à água. Devido à estabilização e compactação, esta técnica de construção assegura uma maior velocidade de processamento [4], menor variabilidade [5], um melhor desempenho mecânico e uma maior durabilidade, quando comparada com outras técnicas de construção, tais como o adobe ou a taipa [6].

O cimento é um dos ligantes mais utilizados e eficientes para atuar como estabilizante [7], [8]. Walker & Stace [9] produziram BTC estabilizados com 5% e 10% de cimento com uma pressão de compactação de aproximadamente 2 MPa, confirmando que o aumento do teor de cimento conduziu a uma maior resistência mecânica e durabilidade (absorção por imersão e absorção por capilaridade). Por sua vez, Mahdad & Benidir [10] avaliaram o efeito da estabilização com cimento e da compactação na resistência e durabilidade de BTC. Os resultados mostraram a importância da pressão de compactação na resistência à compressão, atingindo mais de 8 MPa para uma

percentagem de cimento de 8% e uma pressão de compactação de 7 MPa. A absorção à água por imersão reduziu drasticamente com a incorporação de cimento. Bogas et al [11] produziu BTC não estabilizados e estabilizados com 8% cimento e agregados reciclados. A resistência à compressão aos 28 dias dos BTC estabilizados foi cerca de duas vezes superior à dos BTC não estabilizados (5,37 MPa vs 2,37 MPa). Os blocos não estabilizados desintegraram-se quando submersos em água enquanto os BTC estabilizados apresentaram uma absorção por imersão de 14% às 48h e uma absorção por capilaridade de  $20,8 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{1/2}$ . Quando expostos ao *drip test*, os BTC estabilizados não mostraram qualquer sinal de erosão, enquanto os não-estabilizados apresentaram uma profundidade de erosão de 4,3 mm e uma profundidade de penetração de humidade de 57,7 mm. Quando sujeitos ao *spray test* os blocos não estabilizados foram totalmente desintegrados, enquanto os blocos estabilizados não apresentaram danos assinaláveis. Foi assim concluído a necessidade de estabilizar os BTC com cimento.

No entanto, a libertação de enormes quantidades de CO<sub>2</sub> na produção de cimento faz com que a sua incorporação entre em conflito com os objetivos ecológicos e sustentáveis da construção em Terra. Desta forma, o desenvolvimento de estabilizantes alternativos que, sem comprometerem a qualidade da construção em Terra, mantenham a sua sustentabilidade e natureza ecológica é fundamental. Nesse sentido, no âmbito do projeto EcoHydb [12] conduzido no departamento de engenharia civil do IST, tem sido desenvolvido cimento reciclado (CR) de elevada eco-eficiência, cujo objetivo assenta na termoativação de cimento hidratado proveniente de resíduos de materiais de base cimentícia. Esta estratégia intervém em simultâneo na reutilização de resíduos, na conservação de recursos naturais e na redução de emissões de CO<sub>2</sub>. Tendo em consideração baixas temperaturas de termoativação e a eliminação da etapa de descarbonatação na produção do clínquer, este novo tipo de ligante é capaz de conduzir a mais de 60% de redução nas emissões de CO<sub>2</sub>. Bogas et al [13] verificaram que este novo ligante é capaz de desenvolver resistência semelhantes ao de um cimento Portland (CP). Por sua vez, Carriço et al [14] obteve um cimento reciclado de classe 32,5.

No presente trabalho avalia-se a utilização de CR na estabilização dos BTC, mitigando a sua elevada suscetibilidade à água. Como tal, os BTC foram analisados em termos de absorção por imersão, absorção por capilaridade, absorção a baixa pressão, permeabilidade à água e erosão acelerada por jato de água (*spray test*). Até à data nenhum estudo que visa a incorporação de CR em BTC foi publicado.

## Campanha experimental

**Caracterização dos solos.** Três solos diferentes foram avaliados para a produção de BTC. A distribuição granulométrica foi determinada de acordo com a especificação LNEC E-239 [15], após a desagregação dos torrões da amostra de solo num almofariz como indicado na especificação LNEC E-195 [16]. A matéria orgânica foi determinada através da reação entre uma amostra de solo com uma quantidade pré-definida de água oxigenada (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) [6]. A massa de matéria orgânica é obtida pela subtração da massa da amostra de solo antes e após a reação (depois de colocada numa estufa ventilada a 105-110 °C até massa constante). Os limites de Atterberg foram determinados com base na norma NP-143 [17] e a massa volúmica seca pela norma NP-83 [18]. O teor ótimo de água foi estimado de acordo com a norma D-698 [19], seguindo o processo de compactação leve num molde pequeno, representando uma pressão de compactação mais compatível com a exercida pela prensa na produção dos blocos [20], [21].

O solo selecionado apresentava natureza argilosa, com 20,1% de gravilha, 48,4% de areia e 31,5% de silte/argila, com um teor de matéria orgânica inferior a 1%. Considera-se este último parâmetro como tendo uma influência pouco significativa nas propriedades dos BTC produzidos [22]. A massa volúmica seca foi de  $2,85 \text{ g/cm}^3$ , superior ao obtido noutros estudos realizados pelos autores [6]. Relativamente aos limites de Atterberg, obteve-se um limite de liquidez de 30% e um limite de plasticidade de 22% o que corresponde a um índice de plasticidade de 8%. Este valores enquadram-se no intervalo recomendado para BTC estabilizados [6, 21]. O teor de água ótimo, que

indica uma estimativa inicial da quantidade de água a adotar na produção dos BTC, foi de 16% para uma massa volúmica seca de aproximadamente 1,8 g/cm<sup>3</sup>.

**Produção e caracterização do Cimento Reciclado (CR).** O cimento reciclado foi produzido a partir de pastas de cimento CEM I 42,5R com uma razão a/l de 0,45, e com pelo menos 120 dias de idade. A massa volúmica do cimento foi de 3,07 g/cm<sup>3</sup> e a resistência à compressão a 1, 7 e 28 dias em argamassas de referência foi de 16,7 MPa, 43,60 MPa e 57 MPa, respetivamente. O tempo de presa inicial foi de 170 minutos e o final de 280 minutos. O processo de reciclagem da pasta de cimento envolveu a sua britagem, moagem, peneiração e termoativação. Os três primeiros passos consistiram na redução do tamanho das partículas, com o intuito de obter um grau de finura inferior a 250 µm. A fase de termoativação permitiu recuperar as propriedades ligantes do cimento hidratado [24]. Para o efeito, o material foi aquecido a uma taxa de 10°C/min até 650 °C, permanecendo a esta temperatura por 3 horas. O material arrefeceu dentro do forno durante 12h.

A caracterização do cimento reciclado envolveu as suas propriedades física e mecânicas no estado fresco e endurecido, nomeadamente o tempo de presa [25], a massa volúmica (através da medição por picnómetro de hélio), o espalhamento [26] e a resistência à flexão e à compressão em pastas de cimentos com razão água/cimento de 0,73 para uma consistência normal [27]. As pastas foram produzidas de acordo com a EN 1015-2 [27] numa misturadora de eixo vertical. Obteve-se uma massa volúmica para o CR de 3,00 g/cm<sup>3</sup> e uma resistência à compressão a 3, 7 e 28 dias de 9,8 MPa, 13,7 MPa e 17,3 MPa, respetivamente. A resistência à flexão aos 3, 7 e 28 dias foi de 0,96 MPa, 1,17 MPa e 1,22 MPa, respetivamente. Estas resistências foram ligeiramente inferiores às reportadas por Carvalho [28], tendo em conta pastas de igual a/l. No entanto, que a resistência à flexão e a resistência à compressão são semelhantes com outros estudos [10, 12, 25, 26]. Em geral, considera-se que foi possível produzir CR com boa capacidade de hidratação, atingindo resistências aos 28 dias de 65% das obtidas em pastas de CP com igual a/l. O tempo de presa inicial foi de 290 minutos e o final de 385 minutos. Tendo em conta a resistência obtida por Carvalho [28] é possível concluir que o cimento reciclado foi capaz de atingir uma capacidade de hidratação adequada, atingindo resistências aos 28 dias de 65% quando comparado com pastas de CP com a/l semelhante. O início do tempo de presa foi cerca de 1,7 vezes superior ao obtido para pastas de CP. Este retardamento é justificado pela menor finura e maior aglomeração do CR, bem como a reação mais lenta dos novos polimorfos de C<sub>2</sub>S na sua constituição face ao C<sub>3</sub>S no CP, conduzindo a um período de indução mais prolongado do que o cimento Portland [30]. Para a mesma razão a/l, as pastas com CP apresentaram uma consistência mais fluida para espalhamentos muito superiores aos obtidos nas pastas de CR de consistência normal. Este aumento da exigência de água está associado à elevada área superficial das partículas, bem como à sua natureza porosa e elevado teor de cal livre, sendo igualmente reportado por outros autores [31].

**Produção, composição e caracterização dos blocos.** No presente trabalho foram produzidos blocos com uma dimensão de 220x105x60 mm. O teor de água foi ajustado através do método da bola (*drop test*, [32]). A composição de cada mistura encontra-se na Tabela 1. Foram produzidos blocos de terra com 5 ou 10% de estabilizante, utilizando CP ou CR. Na designação dos blocos, o tipo de estabilizante é seguido do teor utilizado (CP5 e CP10 ou CR5 e CR10). Foram também produzidos blocos com diferentes percentagens de incorporação de CR (20%, 50%) em substituição de CP, para 10% de estabilizante – CR2CP8 e CR5CP5. Finalmente, foram ainda produzidos blocos não estabilizados (“T”) para efeitos de comparação.

Tabela 1: Composição dos blocos produzidos

Mistura	Solo <sup>a</sup> (%)	CP <sup>b</sup> (%)	CR <sup>b</sup> (%)	Água (%)	a/l
CP10	90	10	-	15,0	1,10
CR10	90	-	10	16,5	1,25
CP5	95	5	-	15,2	2,20
CR5	95	-	5	15,2	2,50
CR2CP8	90	2	8	15,0	1,10
CR5CP5	90	5	5	15,5	1,20
T	100	-	-	14,4	-

<sup>a</sup> percentagem em massa de solo com 4% humidade; <sup>b</sup> percentagem em peso seco de estabilizante

Os blocos foram produzidos numa prensa manual com uma força de compactação de aproximadamente 150 kN. Para os blocos não estabilizados adotou-se cura seca e nos blocos estabilizados cura húmida. Neste último caso, os blocos foram cobertos com uma lona plástica e, nos primeiros 7 dias, humedecidos em intervalos de 1 em 1 hora, durante o período diurno. A caracterização dos BTC consistiu na determinação da sua massa volúmica no estado fresco e endurecido, absorção por imersão, absorção por capilaridade, absorção a baixa pressão, permeabilidade e erosão acelerada (*spray test*). Os blocos foram caracterizados aos 28 dias. A massa volúmica dos BTC foi determinada através da norma NP EN 772-13 [33]. Os blocos foram secos em estufa ventilada até massa constante, blocos imersos em água até à idade do ensaio e blocos colocados em ambiente laboratorial com temperatura de 19-26°C e humidade relativa de 55 a 75%. Para a determinação da absorção à água por imersão foi adotada a especificação LNEC E-394 [34] e a norma NBR 8492 [35]. Neste ensaio foram avaliados blocos curados em condições laboratoriais. A absorção de água por capilaridade foi realizada de acordo com as normas NTC 5324 [36] e NP EN 772-11 [37] para blocos previamente secos em estufa ventilada até massa constante. Contrariamente ao indicado nestas normas, os blocos foram ensaiados na vertical e posicionados de modo a submergir a face lateral em aproximadamente 5 mm de altura. Para o ensaio de absorção de água a baixa pressão os blocos foram igualmente secos em estufa até massa constante. O ensaio seguiu a norma EN 16302 [38], tendo-se utilizado tubos de Karsten para superfícies verticais com uma abertura de 2,5 cm de diâmetro e capacidade de 4 cm<sup>3</sup>. A permeabilidade à água foi ensaiada em blocos colocados em ambiente de laboratório. Consistiu, em submeter metades de blocos a uma pressão de água constante de 100 kPa e registar o caudal de água escoado durante 5 minutos, como é explicado de forma detalhada por Silva [6]. Por fim, a determinação da resistência à erosão dos BTC teve como base a norma NZS 4298 [32] e consistiu em direcionar um jato de água horizontal com uma pressão de 0,5 bar durante 1 hora ou até à rotura do bloco, com paragens de 15 em 15 minutos. Contrariamente ao sugerido pelo documento normativo, e devido à reduzida dimensão dos blocos, a área de exposição ao jato de água foi de 100 mm de diâmetro. Complementarmente, o ensaio foi ainda realizado para uma pressão de 1 e de 2,5 bar (pressão máxima garantida pela rede de distribuição). Foram ensaiados provetes previamente condicionados em ambiente de laboratório.

## Resultados e discussão

Os principais resultados médios obtidos para cada composição apresentam-se na Tabela 2. Foram avaliadas a massa volúmica fresca ( $MV_f$ ), a massa volúmica seca ( $MV_{seca}$ ), a massa volúmica em ambiente laboratorial ( $MV_{lab}$ ), a massa volúmica saturada ( $MV_{sat}$ ), a absorção por imersão ( $A$ ), o coeficiente de absorção capilar ( $C_b$ ), o coeficiente de absorção a baixa-pressão ( $C_{abs}$ ), o coeficiente de permeabilidade ( $K_w$ ) e a profundidade de erosão (PE) e a profundidade de humidade (PH) resultantes do *spray test*.

Tabela 2: Resultados médios para cada composição

Propriedades	CP10	CR10	CP5	CR5	CR2CP8	CR5CP5	T
$MV_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	1990	1870	1950	1880	1950	1870	2030
$MV_{seca}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1730	1630	-	-	1690	1650	1790
$MV_{lab}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1860	1730	1780	1720	1800	1780	1820
$MV_{sat}$ (kg/m <sup>3</sup> )	2080	1910	-	-	1970	1950	-
$A_{24h}$ (% massa)	18,8	21,5	-	-	19,3	21,0	-
$A_{48h}$ (% massa)	19,0	22,0	-	-	19,9	21,5	-
$A_{24h}$ (% volume)	32,6	35,1	-	-	32,5	34,5	-
$A_{48h}$ (% volume)	32,9	35,8	-	-	33,5	35,3	-
$C_b$ (g/cm <sup>2</sup> .min <sup>0.5</sup> )	6,38	10,75	-	-	9,41	7,87	-
$C_{abs,5min}$ (kg/m <sup>2</sup> .s)	0,008	0,012	-	-	0,016	0,011	-
$K_w$ (x10 <sup>-7</sup> m/s)	2,8	6,1	-	-	4,2	4,8	-
PE (mm)	0	0	-	-	-	0	Erosão total dos blocos
PH (mm)	38	39	-	-	-	36	

**Massa volúmica e porosidade.** Como a massa volúmica do CP foi aproximadamente 10% superior à da terra, seria expectável que os blocos estabilizados com CP apresentassem  $MV_f$  superior à dos blocos não estabilizados. No entanto, as misturas com CP foram produzidas com um maior teor de água do que os blocos não estabilizados. No caso dos blocos estabilizados com CR, é possível observar que a  $\rho_f$  é 4-6% inferior à dos BTC estabilizados com CP. Os primeiros foram produzidos com uma maior razão a/l devido à maior exigência de água do CR, o que contribui para uma maior dificuldade de compactação das misturas.

A  $MV_{seca}$  variou entre 1630 e 1790  $kg/m^3$ . Os BTC não estabilizados apresentaram uma massa volúmica seca mais próxima dos BTC estabilizados com CP. De facto, nos blocos não estabilizados toda a água de mistura evapora, enquanto nos blocos com CP parte da água reage com o cimento, aumentando a massa volúmica. Os BTC com cimento reciclado apresentaram as menores  $MV_{seca}$ . A variação da massa volúmica fresca para a massa volúmica seca foi ligeiramente superior nos blocos com CP (260  $kg/m^3$ ) do que nos blocos com RC (240  $kg/m^3$ ). De facto, os silicatos de cálcio presentes no cimento reciclado encontram-se na forma de diferentes polimorfos do  $C_2S$ , enquanto no cimento Portland o principal componente é a alite ( $C_3S$ ). Uma vez que a reação de hidratação do  $C_3S$  envolve uma maior incorporação de água quimicamente ligada [39], os BTC com CR vão reter menor quantidade de água de hidratação. Além disto, como o cimento reciclado foi produzido a partir de pastas de cimento antigas sujeitas a termoactivação, moagem e armazenamento, apresentará um maior teor de substâncias carbonatadas [13]. Como tal, seria expectável que a diferença entre a massa volúmica fresca e a massa volúmica seca de BTC com CR fosse maior.

Em condições de saturação, os blocos apresentaram um aumento da sua massa volúmica entre 16,8% e 20,1% enquanto em contacto directo com a água os blocos não estabilizados perderam a sua coesão.

Sabendo a composição (Tabela 1) e a massa volúmica fresca (Tabela 2) foi possível estimar aproximadamente a porosidade total dos BTC no estado endurecido, a longo prazo. Para tal, a porosidade total dos blocos corresponde ao volume de vazios ( $V_v$ ) equivalente à soma do volume de ar e do volume de água que não reage com o cimento. De acordo com Neville [39] a água de hidratação corresponde a cerca de 23% da massa de cimento, dependendo do tipo e composição do mesmo. Neste estudo foi considerado 22% para os BTC com CR, devido à presença maioritária de  $C_2S$ . Assumiu-se ainda que o nível de hidratação dos blocos correspondeu a cerca de 80% [6]. Na determinação do volume dos produtos hidratados, assume-se que este corresponde à soma do volume de cimento anidro com o volume de água combinada, reduzido de 0,254 [39]. Assim, a porosidade total foi de 36,4%, 41%, 39,2%, 41,7%, 37,5%, 40,2% e 37,9% para as misturas CP10, CR10, CP5, CR5, CR2CP8, CR5CP5 e T, respetivamente. Os valores estimados são superiores aos obtidos noutros estudos [6, 41] cuja porosidade foi de cerca de 30% em BTC com 8% CP e 35% em BTC não estabilizados.

A Figura 1 apresenta a relação obtida entre a massa volúmica em condições laboratoriais ( $MV_{28d}$ ) e a porosidade total no estado endurecido, a longo prazo ( $P_{T,Mvf}$ ).

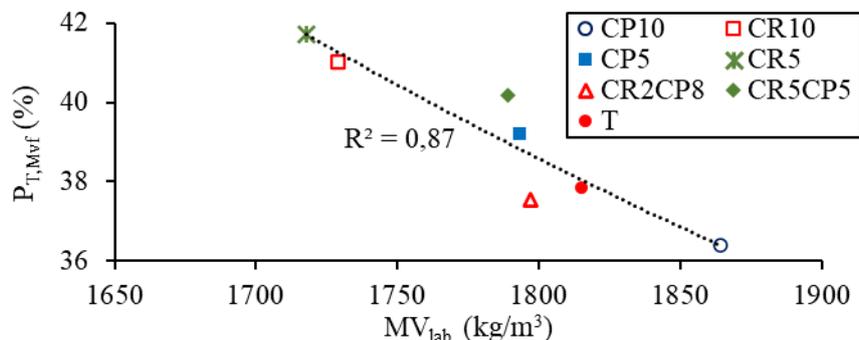


Figura 1: Relação entre a massa volúmica ( $MV_{lab}$ ) e a porosidade total ( $P_{T,Mvf}$ )

Tal como seria expectável, existe uma elevada correlação entre estas duas propriedades. Verifica-se que foram obtidos blocos com menor compactidade ao incorporar cimento reciclado

como ligante. Isso resulta da maior dificuldade de produção associada à maior exigência de água do CR.

**Absorção de água por imersão.** Esta propriedade foi apenas medida para BTC estabilizados com 10% de ligante. Os blocos não estabilizados perderam gradualmente a sua coesão após contacto com a água e os restantes não sofreram qualquer deterioração visível durante 48h.

A absorção ocorreu essencialmente durante as primeiras 24h, com um ligeiro aumento até às 48h (Tabela 2). De um modo geral, é possível observar uma tendência crescente da absorção com a incorporação de CR. A absorção em blocos com CR foi até 14% superior à dos blocos estabilizados apenas com CP. Estas diferenças são atenuadas caso a absorção seja considerada em percentagem de volume. Estes valores correspondem a cerca de 90% da porosidade total estimada em 3.1, ou seja, pelo menos 90% da porosidade dos BTC foi acessível à água num dado período. Já nas misturas com cimento reciclado a fração de porosidade acessível à água foi ligeiramente inferior (87-89%), o que sugere uma menor interconectividade da sua estrutura porosa. Este maior refinamento está de acordo com o reportado por Bogas et al. [13]

A maior absorção em blocos com CR está relacionada com a sua maior porosidade total e, conseqüentemente, menor compactidade. A Figura 2 mostra a relação entre a porosidade total ( $P_{T,Mvf}$ ) e a absorção às 48h para os blocos produzidos no presente trabalho.

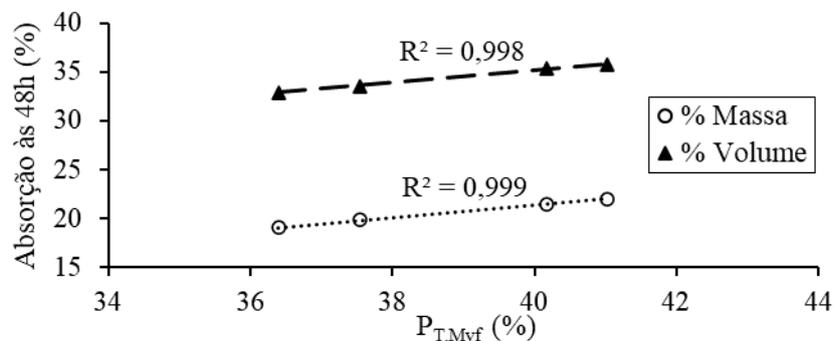


Figura 2: Relação entre a absorção e a porosidade total ( $P_{T,Mvf}$ )

De acordo com Walker [41] os valores típicos de absorção para BTC podem variar entre os 10 e os 25%. Os resultados obtidos no presente trabalho estão enquadrados neste intervalo. Blocos com absorção (% massa) às 24h inferior a 20% são considerados adequados para aplicações em ambientes húmidos [35]. Apenas os BTC com até 20% de substituição de CP por CR cumprem este requisito. Silva [6] obteve absorções às 48h de apenas 13,3% para BTC estabilizados com 8% CP.

**Absorção de água por capilaridade.** A Figura 3 mostra a evolução até 72h da absorção capilar e a Figura 4 o coeficiente de absorção ao longo do tempo para blocos estabilizados com 10% de ligante.

Tal como observado na absorção por imersão, ocorreu um aumento na taxa de absorção e do volume de água absorvida às 72 horas nos BTC com 10% CR. Este aumento está relacionado com a maior porosidade dos blocos com CR (associada a uma maior razão a/l e maior volume de pasta), bem como com o maior refinamento da porosidade destas misturas, para um idêntico nível de porosidade [13]. A absorção às 72 horas para os blocos com 10% CR foi cerca de 70% superior à dos blocos com 10% CP.

Tal como referido em 2.3 os blocos foram ensaiados na vertical, perpendicularmente à direção de compactação, o que aumenta as suas propriedades de absorção. No entanto, os valores obtidos para blocos com 10% de CP foram ligeiramente superiores ao reportado por Lopes [40] em blocos ensaiados na mesma direção com 8% CP.

Como a porosidade total foi superior nos blocos com substituição de CP por CR de 50% face aos blocos com 20% de substituição seria expectável uma maior absorção. No entanto, verifica-se que as diferenças não foram significativas entre estes BTC.

De acordo com a norma NTC 5324 [36] os blocos podem ser classificados tendo em consideração o coeficiente de absorção aos 10 minutos ( $C_{b,10min}$ ): I -  $C_{b,10min} \leq 20 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$  -

“muito baixa absorção”; II –  $40 \text{ g/cm}^2 \cdot \text{min}^{0.5}$  – “baixa absorção”. Assim sendo, os BTC com 10% CP estão inseridos na classe I e os BTC com 10% CR na classe II.

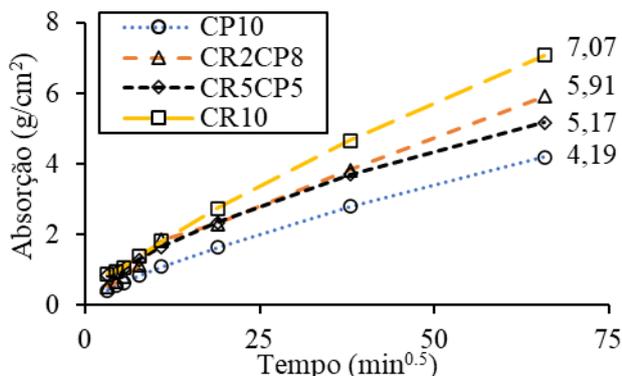


Figura 3: Evolução da absorção de água por capilaridade

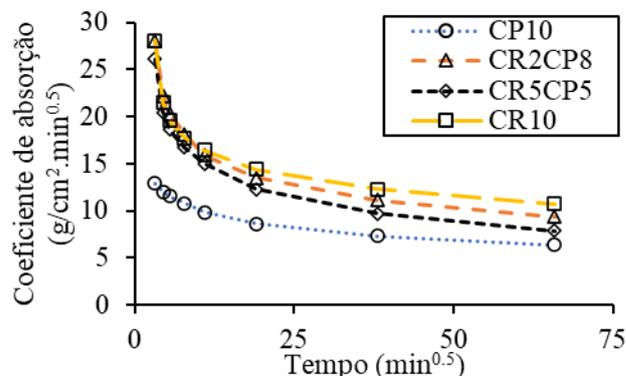


Figura 4: Evolução do coeficiente de absorção de água por capilaridade

**Absorção a baixa pressão.** Em concordância com os restantes ensaios de absorção, a mistura CP10 apresentou a menor taxa de absorção ao longo do tempo. Neste caso, o tempo de absorção dos blocos estabilizados com 10% CR (12 min) foi 56% inferior e o coeficiente de absorção aos 5 minutos ( $0,012 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ) 50% superior ao obtido para blocos estabilizados com 10% CP. Tal como verificado na absorção capilar, os blocos estabilizados com 8% CP e 2% CR apresentaram um pior desempenho do que os BTC com maior teor de incorporação de CR, inclusivamente 10%. Como tal, a absorção a baixa pressão apresentou uma fraca relação com a porosidade total. Tal pode ser justificado pelos diferentes teores de humidade dos provetes antes do ensaio. Lopes [40], para blocos estabilizados com 8% cimento Portland, reportou uma absorção de  $0,7 \text{ g/cm}^2$  após 10 minutos, 64% superior ao obtido no presente estudo para blocos com 10% CP ( $1,1 \text{ g/cm}^2$ ). As diferenças podem ser justificadas pela diferente compactidade atingida, mas também pelas condições de humidade na altura do ensaio.

**Permeabilidade à água.** Verifica-se que a permeabilidade à água dos blocos aumentou com a percentagem de incorporação de CR em substituição do CP (Tabela 2). O coeficiente de permeabilidade ( $K_w$ ) variou de  $2,8 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  para blocos estabilizados com 10% CP e  $6,1 \times 10^{-7} \text{ m/s}$  para blocos estabilizados com 10% CR. A mesma ordem de grandeza foi reportada em outros estudos para 8% CP [6, 41]. Bahar et al [20] atingiu um coeficiente de  $7,8 \times 10^{-8} \text{ m/s}$  para cilindros de terra estabilizados com 10% cimento. Este valor mais baixo pode ser resultado da maior compactação utilizada na produção. Geralmente betões de qualidade baixa/média apresentam valores de  $K_w$  na ordem de grandeza de  $10^{-16}$  a  $10^{-10} \text{ m/s}$  [42]. Por sua vez, Delgado & Guerrero [43] reportam valores na ordem de grandeza de  $10^{-8} \text{ m/s}$  para paredes de taipa. Conclui-se assim que a permeabilidade à água assume maior importância nos BTC, sendo comparáveis, em termos de desempenho, a betões muito pobres. A permeabilidade à água segue a tendência da porosidade total (Figura 5). No entanto, destaca-se, tal como na absorção capilar, a observação de semelhanças entre os blocos CR2CP8 e CR5CP5, apesar destes últimos apresentarem uma maior porosidade total.

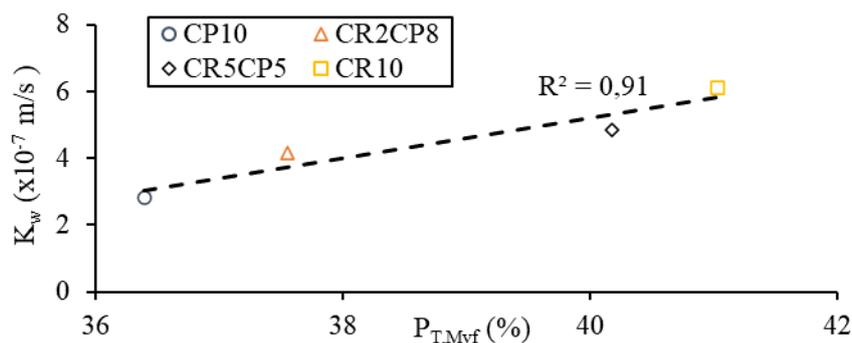


Figura 5: Relação entre o coeficiente de permeabilidade ( $K_w$ ) e a porosidade total ( $P_{T,Mvf}$ )

**Erosão acelerada (*spray test*).** Independentemente do tipo de ligante, os blocos estabilizados mostraram uma boa durabilidade quando expostos ao *spray test* (Tabela 3). Tal como indicado na norma NZS 4298 [32] todos estes blocos apresentaram uma erosão desprezável quando sujeitos a uma pressão de 0,5 bar, podendo ser classificados como sendo da classe IE1 (IE- índice de erosão em mm, conforme as seguintes classes:  $0 \leq PE < 10$  (IE1);  $10 \leq PE < 25$  (IE 2);  $25 \leq PE < 45$  (IE 3);  $45 \leq PE < 60$  (IE4);  $60 \leq PE$  (IE5)). Mesmo aumentando a pressão do jato de água para 1 bar e para 2,5 bar a erosão continuou desprezável após 1 hora de ensaio. A penetração da humidade foi muito similar nos BTC estabilizados, concluindo-se que o comportamento à ação da água foi elevado, independentemente do tipo de ligante. Resultados semelhantes para a penetração da humidade foram reportados por Silva [6] em BTC estabilizados com 8% cimento (40 mm). Em misturas com 4% cimento e 4% cal a penetração de humidade obtida foi 43% superior, revelando uma pior capacidade da cal e salientando a eficiência do CR. Ao fim de 7 minutos, e para uma pressão de 0,5 bar, os blocos não estabilizados foram totalmente erodidos. Como tal não é recomendada a sua utilização em aplicações desprotegidas da ação direta da água.

Tabela 3: Resultados do ensaio de erosão acelerada

Mistura	Pressão (bar)	Tempo de ensaio (min)	Profundidade da erosão, PE (mm)	Profundidade da humidade, PH, para 2,5 bar (mm)
CP10	0,5 1 2,5	60	-	38
CR5CP5	0,5 1 2,5	60	-	36
CR10	0,5 1 2,5	60	-	39
T	0,5	7	60	N/A

## Conclusões

Os blocos produzidos apresentaram uma massa volúmica fresca entre 1870 e 2030 kg/m<sup>3</sup>, para porosidades totais de 36,4-41,7%. A elevada exigência de água por parte do cimento reciclado promove a diminuição da compacidade dos blocos. Deste modo, os blocos com cimento reciclado apresentaram uma menor massa volúmica e uma maior porosidade total. Como seria de esperar, foi possível observar uma boa correlação entre a massa volúmica e a porosidade total.

Os blocos não estabilizados apresentaram uma grande sensibilidade à água, desagregando-se rapidamente após o seu contacto. Por outro lado, o cimento Portland (CP) e o cimento reciclado (CR) foram eficientes na estabilização dos BTC, permitindo manter a integridade dos blocos em contacto com a água.

De modo geral, a absorção aumentou com a incorporação de cimento reciclado. Mais de 90% da porosidade do BTC foi acessível à água, revelando a elevada interconectividade da sua estrutura porosa. Como esperado, verificou-se uma boa correlação entre a absorção ou a permeabilidade e a porosidade total dos BTC. Embora a absorção capilar tenha sido medida na vertical, ou seja, no sentido perpendicular ao de prensagem dos blocos, foram observadas taxas de absorção capilar até 70% superiores em blocos com 10% CR do que com 10% CP. Os BTC com CR apresentaram coeficientes de permeabilidade à água de até cerca de duas vezes superiores aos dos BTC com CP. Uma vez que a capacidade de hidratação do CR é elevada, é expectável que a resistência à ação da água dos blocos com CR seja mais próxima do obtido em blocos com CP, caso se promova uma maior otimização da compacidade dos blocos.

Independentemente do tipo de ligante, os blocos estabilizados com 10% de estabilizante mostraram uma excelente resistência à erosão acelerada da água, que simulou o efeito de chuva intensa. Assim, a incorporação de cimento reciclado termoativado mostrou ser viável para a produção de BTC de maior sustentabilidade.

## Agradecimentos

O presente trabalho de investigação foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT), através do projeto PTDC/ECI-CON/0704/2021. Os autores agradecem ainda o apoio do

CERIS/IST através do projeto UIDB/ECI/04625/2020 e a colaboração das Oficinas do convento, Montemor e SECIL pelo fornecimento dos materiais utilizados durante a campanha experimental.

## Referências

- [1] F. V. Riza, I. A. Rahman, and A. M. A. Zaidi, *A Brief Review of Compressed Stabilized Earth Brick (CSEB)*, 2010.
- [2] H. van Damme and H. Houben, *Earth concrete. Stabilization revisited*, Cement and Concrete Research, vol. 114. Elsevier Ltd, (2018) 0–102. doi: 10.1016/j.cemconres.2017.02.035.
- [3] I. Alam, A. Naseer, and A. A. Shah, *Economical stabilization of clay for earth buildings construction in rainy and flood prone areas*, Constr Build Mater, vol. 77, (2015) 154–159, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.046.
- [4] F. Pacheco-Torgal and S. Jalali, *Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction*, Construction and Building Materials, vol. 29. (2012) 512–519. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054.
- [5] V. Rigassi and CRAterre-EAG, *Compressed Earth Blocks: Manual of Production*. Deutsche Development Agency, 1995.
- [6] M. F. Silva, *Blocos de terra compactada com e sem materiais cimentícios*, Master Thesis, Instituto Superior Técnico, 2015.
- [7] S. Jegandan, M. Liska, A. A. M. Osman, and A. Al-Tabbaa, *Sustainable binders for soil stabilisation*, Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement, vol. 163, no. 1, (2010) 53–61, doi: 10.1680/grim.2010.163.1.53.
- [8] H. Miraki, N. Shariatmadari, P. Ghadir, S. Jahandari, Z. Tao, and R. Siddique, *Clayey soil stabilization using alkali-activated volcanic ash and slag*, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, vol. 14, no. 2, (2022) 576–591, doi: 10.1016/j.jrmge.2021.08.012.
- [9] P. Walker and T. Stace, *Properties of some cement stabilised compressed earth blocks and mortars*, 1997.
- [10] M. Mahdad and A. Benidir, *Hydro-mechanical properties and durability of earth blocks: influence of different stabilisers and compaction levels*, International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development, vol. 9, no. 2, (2018) 44–62.
- [11] J. A. Bogas, M. Silva, and M. Glória Gomes, *Unstabilized and stabilized compressed earth blocks with partial incorporation of recycled aggregates*, International Journal of Architectural Heritage, vol. 13, no. 4, (2019) 569–584, doi: 10.1080/15583058.2018.1442891.
- [12] CDW Value, *Project EcoHydB*, 2021. <https://cdwvalue.eu/project-ecohydb> (accessed Aug. 04, 2022).
- [13] J. A. Bogas, A. Carriço, and A. J. Tenza-Abril, *Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes*, Cem Concr Res, (2020) vol. 138, doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106226.
- [14] A. Carriço, S. Real, J. A. Bogas, and M. F. Costa Pereira, *Mortars with thermo activated recycled cement: Fresh and mechanical characterisation*, Constr Build Mater, (2020) vol. 256, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119502.
- [15] LNEC E-239, *Análise granulométrica por peneiração húmida*, 1970.
- [16] LNEC E-195, *Preparação por via seca de amostras para ensaios de identificação*, 1966.
- [17] NP-143, *Determinação dos limites de consistência*, Lisboa, 1969.

- [18] NP-83, Determinação da densidade das partículas, Lisboa, 1965.
- [19] D 698, Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort, West Conshohocken, 2000. [Online]. Available: [www.astm.org](http://www.astm.org),
- [20] R. Bahar, M. Benazzoug, and S. Kenai, *Performance of compacted cement-stabilised soil*, *Cem Concr Compos*, vol. 26, no. 7, (2004) 811–820, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2004.01.003.
- [21] Saul Sitati Namango, *Development of Cost-Effective Earthen Building Material for Housing Wall Construction: Investigations into the Properties of Compressed Earth Blocks Stabilized with Sisal Vegetable Fibres, Cassava Powder and Cement Compositions*, PhD Thesis, 2006.
- [22] ARS 1333, *Compressed stabilized earth blocks-Requirements, production and construction*, Nairobi, 2018. [Online]. Available: [www.arso-oran.org](http://www.arso-oran.org)
- [23] S. Burroughs, *Soil Property Criteria for Rammed Earth Stabilization*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 20, no. 3, (2008) 264–273, doi: 10.1061/ASCE0899-1561200820:3264.
- [24] J. Bandeira, *Caracterização mecânica e retração em argamassas produzidas com cimento reciclado*, Master Thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2020.
- [25] EN 196-3, *Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness*, Lisboa, 2017.
- [26] EN 1015-3, *Methods of test for mortar for masonry Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*, Lisboa, 2004.
- [27] EN 1015-2, *Methods of tests for mortar and masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*, Lisboa, 1998.
- [28] M. Carvalho, *Caracterização de pastas produzidas com cimento reciclado sujeito a diferentes temperaturas de termoativação*, Master Thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2020.
- [29] J. A. Bogas, A. Carriço, and M. F. C. Pereira, *Mechanical characterization of thermal activated low-carbon recycled cement mortars*, *J Clean Prod*, vol. 218, (2019) 377–389, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.325.
- [30] J. A. Bogas, S. Real, A. Carriço, J. C. C. Abrantes, and M. Guedes, *Hydration and phase development of recycled cement*, *Cem Concr Compos*, (2022) vol. 127, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104405.
- [31] R. Baldusco, T. R. S. Nobre, S. C. Angulo, V. A. Quarcioni, and M. A. Cincotto, *Dehydration and Rehydration of Blast Furnace Slag Cement*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 31, no. 8, (2019) 04019132, doi: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0002725.
- [32] NZS 4298, *Materials and workmanship for earth buildings*, 1998.
- [33] NP EN 772-13, *Métodos de ensaio de blocos para alvenaria. Parte 13: Determinação da massa volúmica real seca e da massa volúmica aparente seca de blocos para alvenaria (excepto blocos de pedra natural)*, 2002.
- [34] LNEC E394, *Absorção de água por imersão à pressão atmosférica*, Lisboa, 1993.
- [35] NBR 8492, *Solid soil-cement brick. Determination of compressive strength and water absorption*, 1984.
- [36] NTC 5324, *Bloques de suelo cemento para muros y divisiones. Definiciones. Especificaciones. Metodos de ensayo. Condiciones de entrega*, 2004.

- [37] NP EN 772-11, Unidades de alvenaria - Métodos experimentais - Parte 1: Agregado e natural - Determinação de absorção, Lisboa, 2002.
- [38] EN 16302, Conservation of cultural heritage - Test methods - Measurement of water absorption by pipe method, 2013.
- [39] A. Neville, *Properties of Concrete*, 4th ed. Pearson Education Limited, 1995.
- [40] I. Lopes, *Eficiência de produtos hidrófugos no desempenho face à água de blocos de terra comprimida estabilizados com cimento e não estabilizados*, Master Thesis, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 2015.
- [41] P. Walker, *HB-195: The Australian earth building handbook*. Sydney: Standards Australia International Ltd, 2002.
- [42] N. Roussel, M. R. Geiker, F. Dufour, L. N. Thrane, and P. Szabo, *Computational modeling of concrete flow: General overview*, *Cem Concr Res*, vol. 37, no. 9, (2007) 1298–1307, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.06.007.
- [43] M. C. J. Delgado and I. C. Guerrero, *Earth building in Spain*, *Constr Build Mater*, vol. 20, no. 9, (2006) 679–690, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.02.006.

## O potencial dos resíduos industriais no desenvolvimento de novas argamassas para aplicação em fachadas

MAIA, Joana<sup>1,a</sup>, RAMOS, Nuno M. M.<sup>1,b</sup>, VELOSO, Rita Carvalho<sup>1,2,c</sup>,  
VENTURA, João<sup>2,d</sup>, PEREIRA, Pedro F.<sup>1,e</sup>, CAMPOS, Catarina<sup>4,f</sup>,  
CORVACHO, Helena<sup>1,g</sup>, LOPES, Maria Lurdes<sup>3,h</sup> e CRISTELO, Nuno<sup>4,i</sup>

<sup>1</sup>CONSTRUCT-LFC, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-1465 Porto, Portugal

<sup>2</sup>IFIMUP- Instituto de Física de Materiais Avançados, Nanotecnologia e Fotónica, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Rua do Campo Alegre s/n, 4169-007 Porto, Portugal

<sup>3</sup>CONSTRUCT-GEO, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-1465 Porto, Portugal

<sup>4</sup>Centro de Química - Vila Real, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 5000-801 Vila Real, Portugal

<sup>a</sup>joanamaia@fe.up.pt, <sup>b</sup>nmmr@fe.up.pt, <sup>c</sup>up201001431@fe.up.pt, <sup>d</sup>joventur@fc.up.pt,  
<sup>e</sup>pfpp@fe.up.pt, <sup>f</sup>catarina@utad.pt, <sup>g</sup>corvacho@fe.up.pt, <sup>h</sup>lcosta@fe.up.pt, <sup>i</sup>ncristel@utad.pt

**Palavras-chave:** Resíduos Industriais, Ativação Alcalina, Argamassas, Morfologia, Fachadas.

**Resumo.** A indústria da construção apresenta um elevado consumo de materiais e energia o que tem um impacto muito significativo nas emissões de CO<sub>2</sub>. As indústrias produtiva e da construção são das que mais contribuem para o aumento dessas emissões (cerca de 20% do total). A reintrodução de resíduos industriais, atualmente depositados em aterros, na cadeia produtiva é uma das principais estratégias para atingir a neutralidade carbónica. Nesse sentido, este trabalho foca-se na caracterização e aplicação de resíduos industriais de diversas fontes no desenvolvimento de argamassas para aplicação em fachadas de edifícios. Os resíduos industriais considerados neste estudo consistem em poliuretano, madeira, escórias de incineração de resíduos sólidos urbanos, vidro, cerâmica, cinzas volantes provenientes da queima de carvão em central termoeleétrica e lamas de corte de pedra (granito e mármore). Com o objetivo de reduzir a condutibilidade térmica das argamassas, foram desenvolvidos cimentos alcalinos expansivos, tirando partido das características dos próprios resíduos ou adicionando elementos capazes de promover essa expansão e, conseqüentemente, a respetiva porosidade. Verificou-se que há um potencial relevante para aplicação destas argamassas na redução da transmissão térmica de fachadas, visto terem sido obtidos valores de condutibilidade térmica que permitem a sua classificação como “argamassa térmica”.

### Introdução

O aumento do consumo energético dos edifícios, que representa quase 40% da energia total consumida na Europa, apresenta-se como uma das principais preocupações no contexto atual. Um valor muito significativo que está relacionado com aspetos da vida útil dos edifícios, desde a sua construção até à respetiva demolição. Como tal, a implementação de estratégias que aumentem a eficiência energética dos edifícios e que visem melhorar e otimizar a gestão de resíduos revela-se fundamental [1].

A produção de materiais de construção, nomeadamente de argamassas, e a conseqüente gestão dos respetivos resíduos de construção e demolição (RCD), tornou-se uma importante questão a nível mundial, devido ao significativo volume de resíduos gerados anualmente por esta indústria, com uma grande contribuição para as emissões de dióxido de carbono para a atmosfera [2]. O procedimento atualmente mais comum é o descarte dos RCD em aterros sanitários e depósitos a céu

aberto. Além disso, a geração de resíduos sólidos urbanos atingiu os 1,3 mil milhões de toneladas em 2012, um aumento de 0,62 mil milhões de toneladas comparativamente a 2002 [3]. Essa tendência crescente tem-se acentuado, atingindo-se atualmente as 2,01 mil milhões de toneladas e prevendo-se um acréscimo até 3,4 mil milhões de toneladas anuais em 2050 [4].

Como tal, tem-se vindo a observar uma preocupação crescente em criar novas aplicações para estes resíduos, assim como para resíduos provenientes de outras indústrias, no desenvolvimento de misturas ativadas alcalinamente (i.e. sem incorporação de cimento Portland). A sua reutilização altera o estatuto do “resíduo”, criando assim um “sub-produto”, gerando um passo fundamental para o sucesso na gestão e controlo de resíduos e um contributo direto para a economia circular na indústria da construção.

Portanto, as propriedades dos materiais produzidos dependem fortemente da sua composição química. Nesse sentido e de forma a desenvolver um material não cimentício a partir de resíduos, que exiba uma boa trabalhabilidade, resistência mecânica e ainda potencial de isolamento térmico, é determinante o estudo da sua composição ótima [5]. Tendo estes propósitos em mente, o presente trabalho pretende avaliar a utilização de diferentes resíduos industriais ativados alcalinamente para a produção de argamassas para fachadas com potencial de isolamento térmico.

## Materiais e métodos

**Caracterização físico-química e microestrutural dos resíduos.** Foi selecionado um conjunto de resíduos industriais, de diferentes fornecedores, com potencial para o desenvolvimento destes novos materiais: escórias de incineração de resíduos sólidos urbanos, vidro de garrafa, cerâmica proveniente de pisos, paredes e equipamentos sanitários, cinzas volantes provenientes da queima de carvão em central termoelétrica, granito e mármore. Devido ao processo de corte da pedra, geralmente lubrificado por água, os resíduos de mármore e granito apresentam granulometria de maior dimensão criada pelo excesso de humidade, sendo classificadas como lamas de corte de pedra.

Para além dos resíduos mencionados, o estudo contou também com a adição de resíduos de poliuretano e madeira (maioritariamente composta por *Pinus Pinaster*) na função de agregados uma vez que são considerados materiais inertes, potenciando o desenvolvimento de misturas altamente porosas. Pode observar-se na Figura 1 alguns dos resíduos selecionados.

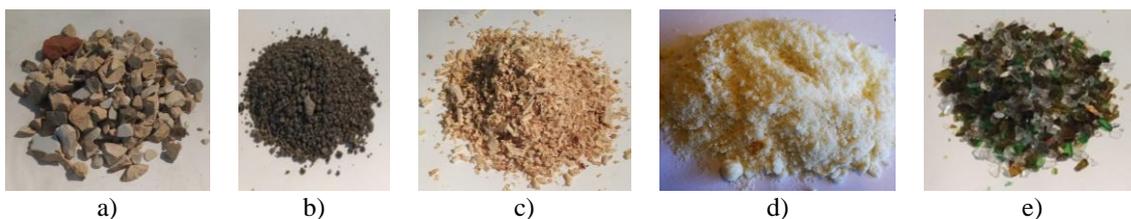


Figura 1: Exemplo de resíduos recolhidos: a) cerâmica; b) escória; c) madeira; d) poliuretano; e) vidro

Devido às características intrínsecas de cada resíduo, adequou-se o plano de ensaios com vista à caracterização das propriedades mais relevantes e de acordo com a sua adequabilidade ao método de ensaio.

Para além da natureza e composição dos resíduos precursores, a finura das partículas também desempenha um papel crucial na determinação das características das misturas. Partículas mais finas podem oferecer maior reatividade e polimerização mais forte, o que por sua vez pode ajudar a produzir uma mistura com microestrutura mais densa e resistente. Tal facto está associado à maior área superficial específica dos materiais, uma vez que o processo de dissolução ocorre mais rápido, levando a um menor tempo de presa e desenvolvimento precoce da resistência [6]. Foi estudada a granulometria dos resíduos com recurso a peneiração ou difração a laser, conforme o material, sendo a distribuição granulométrica determinada de acordo com a ISO 17892-4 [7].

De modo a reduzir o tamanho de partícula dos resíduos, aspeto fundamental na otimização da reatividade, utilizou-se a máquina de abrasão de Los Angeles de modo a reduzir a sua granulometria (Figura 2). Os resíduos cerâmicos e escória foram moídos entre 24 a 36 horas numa proporção de 1:1 de bolas metálicas relativamente ao peso do material a moer. Por serem lamas de corte de pedra, os resíduos de mármore e granito implicaram desagregação e peneiração prévia de modo a retirar quaisquer contaminações de lâminas de corte usadas na pedra. O mesmo procedimento foi aplicado ao poliuretano uma vez que possuía alguns grãos de grande tamanho. Pode observar-se na Figura 3, alguns dos resíduos após tratamento.

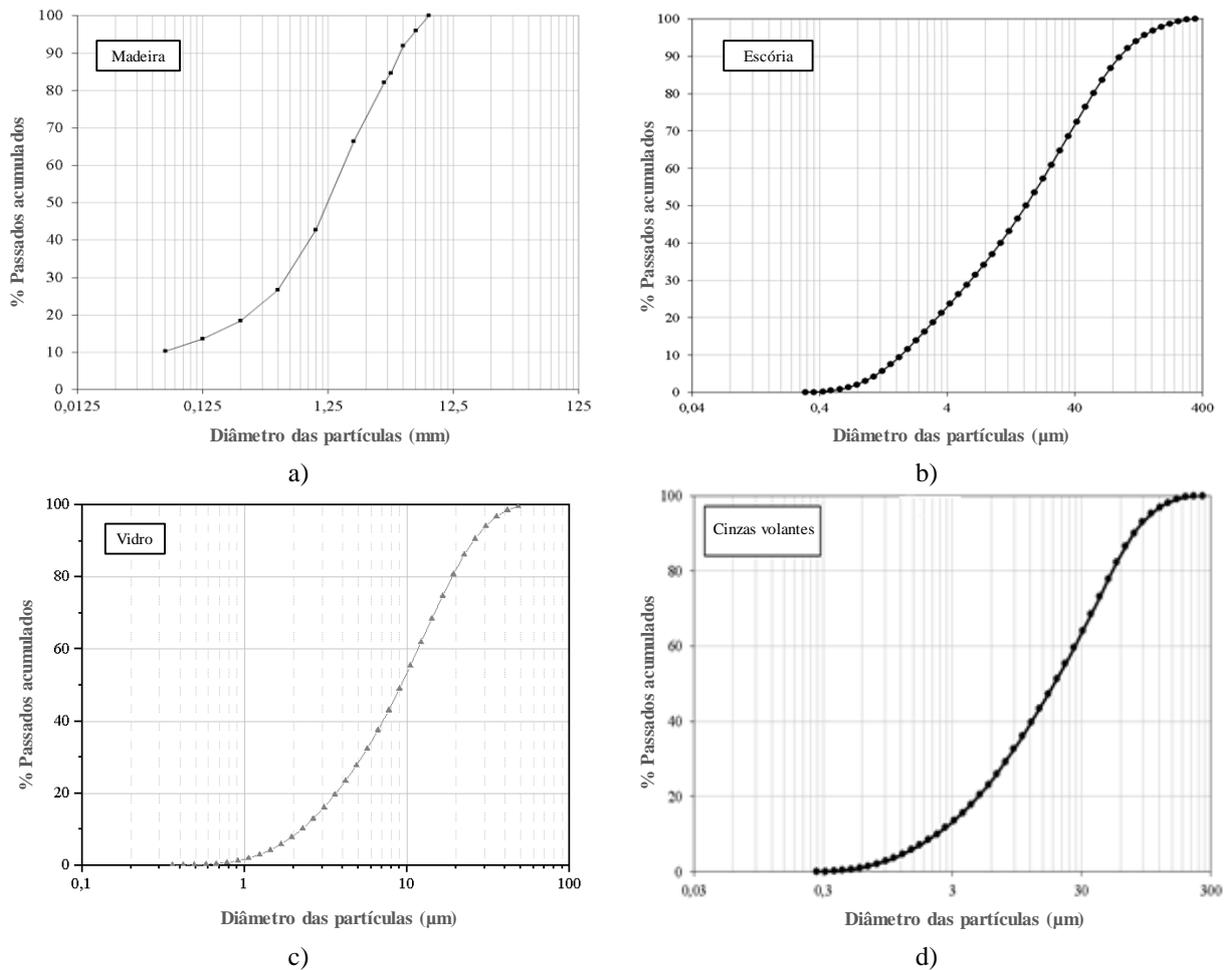


Figura 2: Curva granulométrica: madeira (a); escória (b); vidro (c); cinza volante (d)

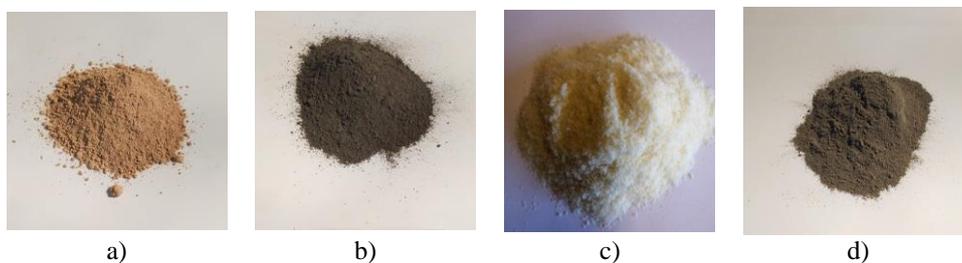


Figura 3: Exemplo de resíduos armazenados após tratamento e acondicionamento: a) cerâmica; b) escória; c) poliuretano; d) vidro

De forma a avaliar a microestrutura e composição dos resíduos recorreu-se à microscopia eletrónica de varrimento (Scanning Electron Microscopy - SEM), difração (XRD) e fluorescência de raios X (XRF). As imagens de SEM, em diferentes ampliações, revelam partículas com tamanho micrométrico e com morfologia irregular. Observando a Figura 4, verifica-se que resíduos submetidos ao tratamento de abrasão Los Angeles, como foi o caso das escórias, mármore, granito e

cerâmica, apresentam tamanho de partículas inferiores a 10 µm. No caso dos resíduos cerâmico e granito, observam-se ainda partículas finas na forma aglomerada, enquanto no poliuretano verifica-se uma estrutura irregular e heterogênea.

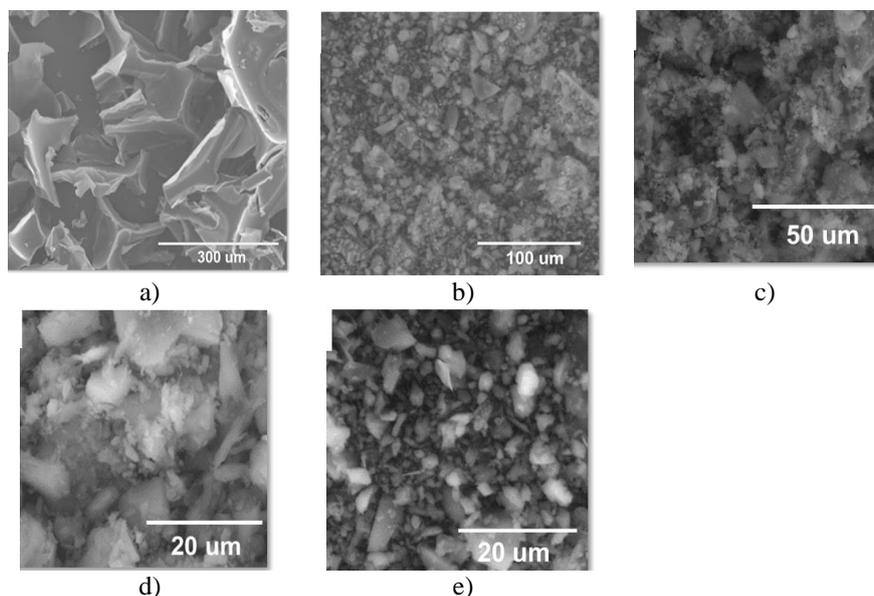


Figura 4: Análise por microscopia eletrônica de: a) poliuretano; b) escória; c) cerâmica; d) granito; e) mármore

Na análise por raios X (XRD e XRF) dos resíduos de pedra (mármore e granito), escórias, cerâmica e cinzas volantes, observam-se traços predominantes de quartzo, à semelhança do resíduo de vidro majoritariamente constituído por SiO<sub>2</sub>. No caso dos resíduos de mármore são observados traços de albita, feldspato e moscovita e no granito, para além de moscovita, estão presentes clorite e oligoclase constituintes naturais da pedra (Figura 5). As cinzas volantes, provenientes da queima do carvão para a produção de eletricidade, apresentam textura mais fina e são compostas basicamente por silício e alumínio (na forma de Mullite) e com baixo teor de ferro. Para além do silício, os resíduos cerâmicos apresentam ainda traços de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) que contribui, por exemplo, para uma maior resistência a ácidos, uma vez que é quimicamente inerte e está disponível em grandes quantidades. A Tabela 1 apresenta o resumo da composição de cada resíduo determinada por XRF.

Tabela 1: Resumo da composição dos resíduos não inertes determinada por XRF.

Resíduo	Escórias	Vidro	Cerâmica	Cinza Volante	Mármore	Granito
Composto	[norm. wt. %]					
Na <sub>2</sub> O	9,44	12,28	2,49	1,12	5,25	6,37
MgO	8,47	1,31	2,59	1,46	2,37	1,51
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12,87	2,39	35,18	21,44	20,12	24,36
SiO <sub>2</sub>	93,58	68,27	139,74	56,11	99,71	144,83
Cl	2,42	---	---	---	---	---
K <sub>2</sub> O	3,76	0,79	6,26	2,81	5,91	10,36
CaO	31,88	12,10	7,32	1,31	43,37	5,24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,90	0,69	2,36	8,20	1,18	2,04

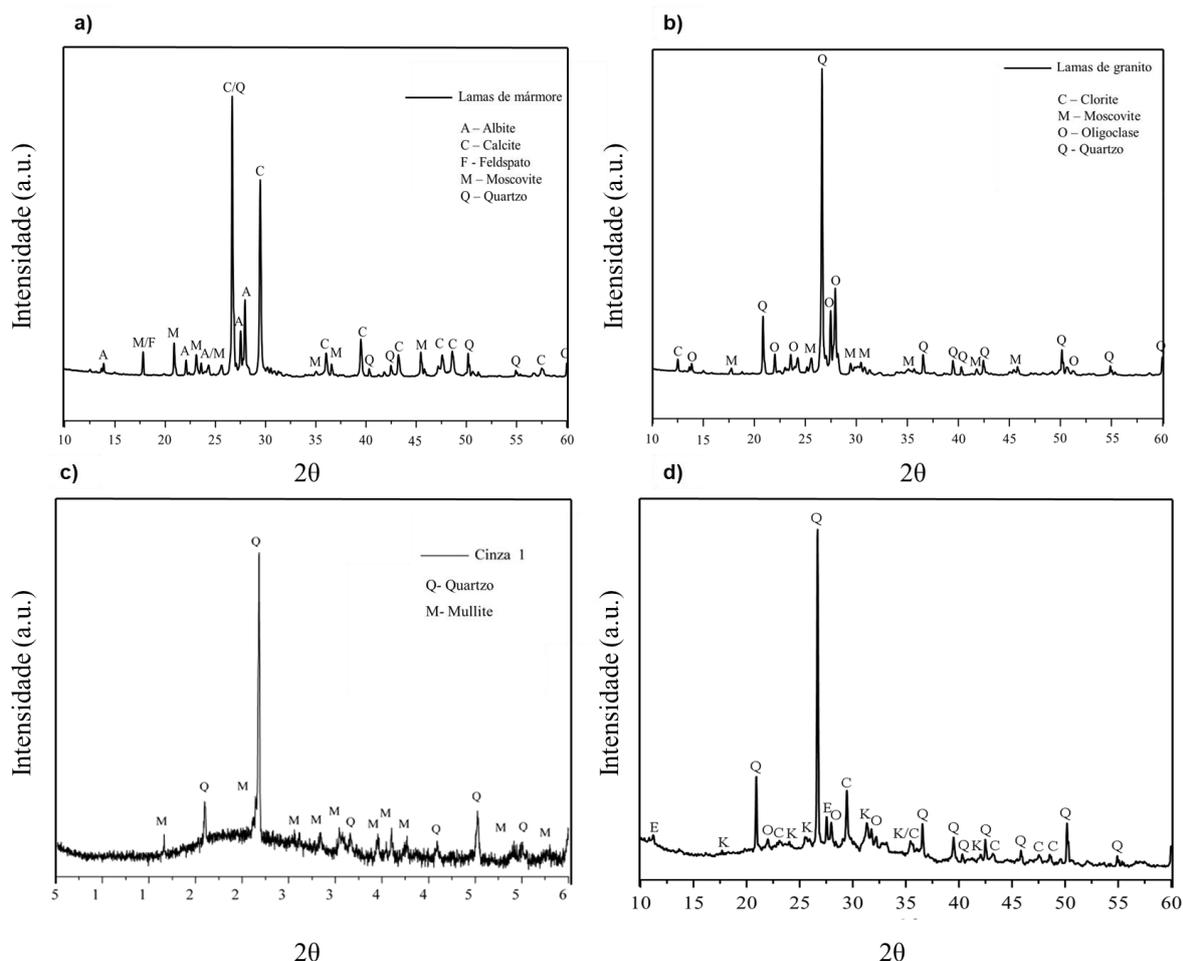


Figura 5: Análise XRD dos resíduos de: a) mármore, b) granito, c) cinza volante e d) escória

**Produção das misturas ativadas alcalinamente.** Após testes preliminares, produziram-se oito misturas utilizando os resíduos disponíveis em diferentes proporções, tal como apresentado na Tabela 2. As misturas foram ativadas alcalinamente usando hidróxido de sódio (NaOH, 4 a 8 mol/L) e silicato de sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) combinados em diferentes proporções, tendo em conta o produto final pretendido, sendo testada previamente a relação sólido/líquido de forma a verificar qual a proporção se apresentaria mais adequada. Após a adição dos ativadores alcalinos aos materiais secos, produziram-se diversos provetes, tendo em vista a sua caracterização experimental, com cura a 85°C durante cerca de 20 horas, como demonstrado na Figura 5.

Tabela 2: Constituição das misturas produzidas

Mistura	Resíduo Precursor (%)								Al (%)	Ativador	
	Mármore	Granito	Cinza Volante	Escória	Cerâmica	Vidro	Poliuretano	Madeira		S / L	H / S
A				100					0,1	0,65	0,50
B					50	50				0,55	0,50
C	100									0,55	0,75
D			100							0,50	0,15
E					77	17	3	3		0,55	0,80
F		45	45				5	5		0,60	0,50
G			90				5	5		0,60	0,30
H	45		45				5	5		0,80	0,50

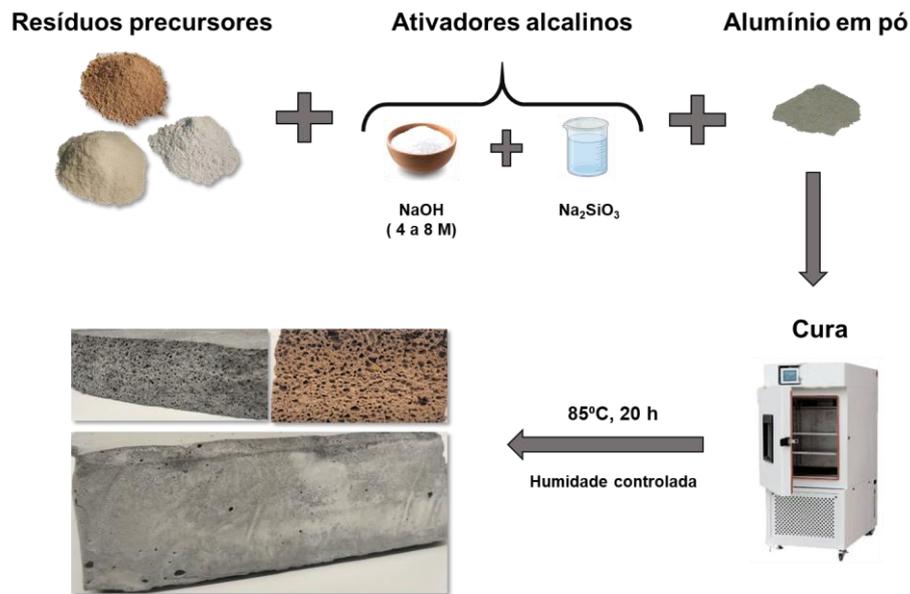


Figura 6: Metodologia experimental aplicada na produção das misturas ativadas alcalinamente

Um efeito resultante da presença de alumínio em conjunto com hidróxido de sódio é a capacidade de produzir gás que, ao ficar encapsulado pela mistura, promove uma ampla formação de poros, reduzindo a massa volúmica final da mistura. Se, por um lado, a diminuição da massa volúmica implica uma redução da resistência mecânica, por outro é possível obter uma melhoria do comportamento térmico [8,9]. Tendo em conta estes princípios, procurou otimizar-se a massa volúmica das misturas.

**Métodos de ensaio.** As várias misturas foram posteriormente submetidas a uma campanha de experimental que incluíram determinação do pH, trabalhabilidade, massa volúmica, resistência à flexão e compressão. Após uma avaliação preliminar destas propriedades, determinou-se a condutibilidade térmica de algumas misturas selecionadas.

A análise de pH foi realizada com recurso a um phmetro e a trabalhabilidade usando um aparelho de Vicat, de acordo com a EN 196-3 [10], aguardando-se até 30 minutos pelo início da “presa”. Este facto, justifica-se pela necessidade de cura térmica das misturas que, após determinado período, deixam de reter o gás produzido libertando-o. Tanto o pH como a trabalhabilidade foram avaliados no estado fresco.

As restantes propriedades foram determinadas para as misturas no estado endurecido. A determinação da massa volúmica seguiu os procedimentos descritos na norma EN 1015-10 [11] e as resistências à flexão e compressão da EN 1015-11 [12].

A condutibilidade térmica foi medida através do método transiente modificado de fonte plana, com adaptação da norma EN 1745 [13], através do equipamento ISOMET 2114 com uma sonda de superfície, a uma temperatura média de 30 °C. De forma a ter um valor de condutibilidade comparável com valores declarados, é necessário converter os valores medidos para as condições de referência pretendidas. Neste estudo, consideraram-se como condições de referência o estado seco e temperatura média de 10 °C. A conversão foi efetuada com recurso à norma ISO/FDIS 10456 [14], considerando como coeficiente de conversão o valor de 0,003 para betão leve, por ser o que mais se aproxima das misturas produzidas. Uma das grandes vantagens deste método é a facilidade de medição e rapidez na obtenção de resultados. Desse modo, é possível obter um valor muito aproximado da condutibilidade térmica efetiva contribuindo para uma otimização mais expedita das misturas.

Produziram-se três provetes com 160x40x40 mm<sup>3</sup> de cada mistura que permitiram a determinação da massa volúmica e da resistência à flexão. As metades resultantes do ensaio de resistência à flexão foram utilizadas para a determinação da resistência à compressão. Para o ensaio de condutibilidade térmica prepararam-se também três provetes de cada mistura com 100x100x30 mm<sup>3</sup>.

## Resultados e discussão

**Propriedades físico-mecânicas.** Apresenta-se na Tabela 3 o resumo das propriedades físico-mecânicas medidas.

Tabela 3: Resumo das propriedades físico-mecânicas

Mistura	pH	Trabalhabilidade	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	Resistência à flexão (MPa)	Resistência à compressão (MPa)
A	11,87	> 30 min	735	0,12	0,34
B	12,71	> 30 min	997	0,49	0,86
C	12,73	> 30 min	763	0,16	0,69
D	12,18	> 30 min	890	0,04	0,29
E	12,57	> 30 min	679	0,41	0,91
F	12,68	> 30 min	606	0,24	0,53
G	12,47	> 30 min	692	0,56	1,04
H	13,20	> 30 min	517	0,22	0,62

Quanto às misturas no estado fresco, verificou-se que o pH variou entre 11,8 e 13,2, classificando-se todas como alcalinas, como seria de esperar. Verificou-se ainda que o início de presa foi superior a 30 minutos, sendo a trabalhabilidade considerada satisfatória.

Quanto às propriedades obtidas no estado endurecido, é possível constatar o efeito da adição dos materiais com função de agregado leve (poliuretano e madeira) na redução da massa volúmica, pois todas as misturas que os incluem na sua constituição (E, F, G e H) apresentam valores inferiores a 700 kg/m<sup>3</sup>. Por outro lado, as misturas B e D, sem adição destes agregados leves, e contendo vidro e cinzas volantes, respetivamente, apresentaram-se mais densas, mas sem um contributo significativo no aumento da resistência mecânica. Este facto indicia uma menor reatividade dos resíduos de vidro, que contribuíram assim para uma maior densidade, mas sem aumento de resistência mecânica. Como se pode observar pela Figura 7 a), há uma grande variabilidade de valores, não sendo perceptível uma tendência clara de evolução da resistência mecânica em função da massa volúmica. Este facto pode relacionar-se com a grande variabilidade de resíduos incorporados com características muito distintas que influenciam significativamente as propriedades no estado endurecido. No entanto, avaliando apenas as misturas com adição de agregados de poliuretano e madeira, é possível constatar, de uma forma geral, que quanto maior a massa volúmica maior a resistência à compressão e flexão, como se pode ver na Figura 7 b). Existe, portanto, um efeito relevante com a incorporação destes agregados, tendo um peso maior nas diferentes propriedades das misturas.

Além disso, as misturas E a H apresentaram valores de resistência à compressão superiores a 0,4 MPa (e inferiores a 2,5 MPa) enquadrando-se na classe CS I de acordo com a EN 998-1 [15], requisito para classificação como argamassa de isolamento térmico. Nesse sentido, selecionaram-se estas quatro misturas com adição de poliuretano e madeira para a avaliação do seu potencial para isolamento térmico.

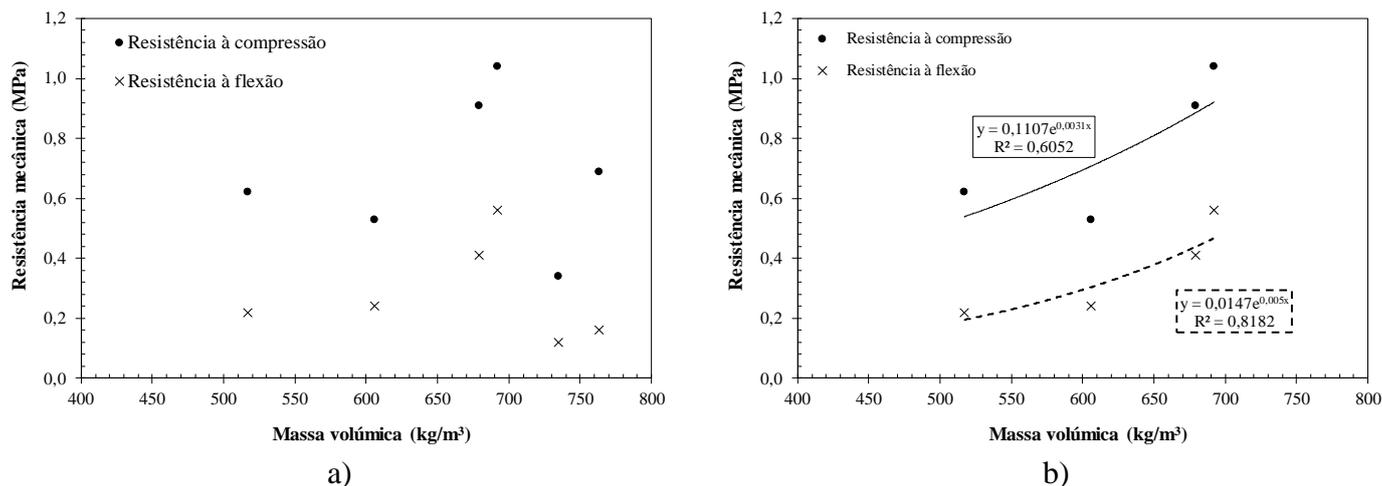


Figura 7: Resistência mecânica em função da massa volúmica: a) Misturas A a H; b) Misturas E a H, com poliuretano e madeira

**Propriedades térmicas.** Apresentam-se na Tabela 4 os resultados obtidos na medição da condutibilidade térmica no estado seco, das quatro misturas selecionadas.

Tabela 4: Condutibilidade térmica no estado seco.

Mistura	Condutibilidade térmica (W/m.°C)	Classificação EN 998-1
E	0,107	T2
F	0,109	T2
G	0,125	T2
H	0,093	T1

De acordo com a norma EN 998-1 [15], as argamassas são classificadas como térmicas se apresentarem uma condutibilidade térmica até 0,2 W/m.°C. Assim sendo, verifica-se que todas as misturas apresentam potencial de isolamento térmico. Além disso, a sua classificação pode subdividir-se, classificando-se como T1 ou T2, se a condutibilidade térmica for inferior a 0,1 W/m.°C ou inferior a 0,2 W/m.°C, respetivamente. Como se pode observar pela Tabela 4, apenas a mistura H se classifica como T1. No entanto, as restantes misturas estão muito próximas deste limite, havendo potencial para explorar esta capacidade.

Observando a Figura 8, constata-se uma tendência crescente da condutibilidade térmica com a massa volúmica. Verifica-se, também, que não considerando a mistura E, a correlação é quase perfeita ( $R^2=0,99$ ). Esta mistura é a mais distinta das quatro misturas analisadas, tendo na sua constituição vidro e cerâmica e apenas 3% de poliuretano e de madeira, enquanto as restantes misturas têm mármore ou granito, cinzas volantes e 5% de poliuretano e de madeira. Novamente, é possível constatar o grande efeito que a incorporação dos diferentes resíduos tem nas propriedades finais destas misturas.

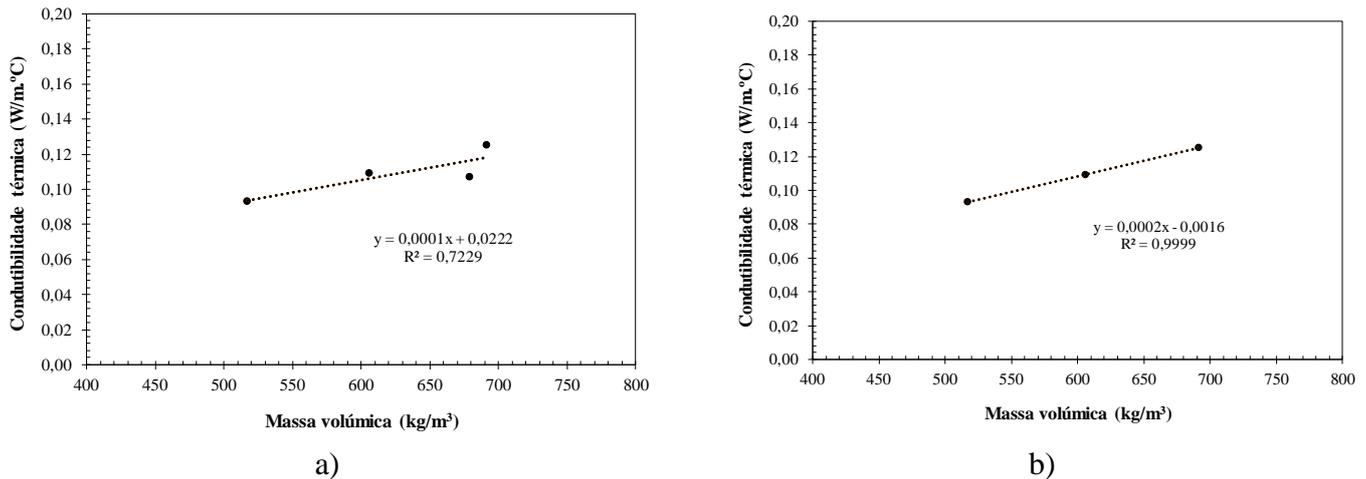


Figura 8: Condutibilidade térmica em função da massa volúmica: : a) Misturas E a H, com 5% poliuretano e madeira; b) Misturas F, G e H, com 3% poliuretano e madeira

## Conclusões

Os resultados apresentados no presente trabalho são promissores e demonstram o potencial da utilização de resíduos em misturas ativadas alcalinamente para fabrico de argamassas com potencial de isolamento térmico. As misturas que incorporaram cinza volante, poliuretano e madeira apresentaram um bom compromisso entre comportamento mecânico e desempenho térmico. Tanto a resistência mecânica como a condutibilidade térmica se apresentaram diretamente proporcionais à massa volúmica. A redução da condutibilidade térmica apresentou uma forte correlação com a massa volúmica, enquanto que as propriedades mecânicas medidas, apesar de também terem alguma correlação com a massa volúmica, demonstraram ser mais sensíveis à percentagem de diferentes resíduos incorporados na mistura. A margem de progressão aparenta ser significativa, sendo importante ter em conta que se tratou de uma primeira abordagem em que, dada a relativa pouca exploração desta estratégia, foi necessário ‘varrer’ uma elevada quantidade de resíduos e combinações, sendo agora essencial um estudo para otimização dos resultados obtidos.

## Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado financeiramente pelo Projeto Circular2B - 37\_CALL#2 – Construção Circular em Edifícios Modulares e Energeticamente Eficientes financiado pelo Programa Ambiente, Clima, Alterações Climáticas e Economia de Baixo Carbono no âmbito do Mecanismo Financeiro do Espaço Económico Europeu através das EEA Grants 2014-2021 e 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). A autora Rita C. Veloso agradece o apoio da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia pelo financiamento da Bolsa de Doutoramento SFRH/BD/148785/2019.

## Referências

- [1] A. Akhtar, A. K. Sarmah, *Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: A global perspective*, Journal of Cleaner Production, vol. 186, (2018) 262-281.
- [2] M.P. Secco, G.J. Bruschi, C.S. Vieira, N. Cristelo, *Geomechanical Behaviour of Recycled Construction and Demolition Waste Submitted to Accelerated Wear*, Sustainability, vol. 14, no. 11, (2022) 6719.

- [3] Hoornweg, Daniel; Bhada-Tata, Perinaz. *What a Waste : A Global Review of Solid Waste Management*. Urban development series; knowledge papers no. 15. World Bank, Washington, DC. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17388>. 2012.
- [4] Kaza, Silpa; Yao, Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank. *What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*. Urban Development; Washington, DC: World Bank. © World Bank. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/30317>. 2018.
- [5] A. Allahverdi, E.N. Kani in: *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste* edited by F.Pacheco-Torgal, V.W.Y. Tam, J.A. Labrincha, Y. Ding, J. de Brito of Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering, chapter 18- *Use of construction and demolition waste (CDW) for alkali-activated or geopolymer cements*, Woodhead Publishing, 2013.
- [6] M. Alhawat, A. Ashour, G. Yildirim, A.Aldemir, M. Sahmaran, *Properties of geopolymers sourced from construction and demolition waste: A review*, Journal of Building Engineering, vol. 50, (2022) 104104.
- [7] ISO 17892-4: Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 4: Determination of particle size distribution, International Organization for Standardization, 2016.
- [8] Maia, J., Ramos, N.M.M., Veiga, R. *Evaluation of the hygrothermal properties of thermal rendering systems*. Building and Environment, 144, (2018) 437-449. DOI: 10.1016/j.buildenv.2018.08.055.
- [9] Maia, J., Pedroso, M., Ramos, N.M.M., Pereira, P. F., Flores-Colen, I., Gomes, M. Glória, Silva, L.. *Hygrothermal performance of a new thermal aerogel-based render under distinct climatic conditions*. Energy and Buildings (2021) 243: 112. DOI: 10.1016/j.enbuild.2021.111001.
- [10] EN 196-3: Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness, CEN – European Committee for Standardization, 2016.
- [11] EN 1015-10: Methods of test for mortar for masonry – Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar, CEN – European Committee for Standardization, 1999.
- [12] EN 1015-11: Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, CEN – European Committee for Standardization, 1999.
- [13] EN 1745: Masonry and masonry products - Methods for determining thermal properties, CEN – European Committee for Standardization, 2020.
- [14] ISO/FDIS 10456: Building materials and products — Hygrothermal properties — Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values, International Organization for Standardization, 2007.
- [15] EN 998-1: Specification for mortar for masonry – Part 1: Rendering and plastering mortar, CEN – European Committee for Standardization, 2016.

## An experimental analysis on the thermal performance of particleboards using olive stone and almond shell wastes

JERÓNIMO Alexandre<sup>1,a</sup>, FERNANDES Mariana<sup>1,2,b</sup> BRIGA-SÁ Ana<sup>1,3,c</sup>

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

<sup>2</sup>Departement of Chemistry, University of Trás-os-Montes e Alto Douro, 5000-801 Vila Real, Portugal.

<sup>3</sup>ECT- School of Science and Technology, University of Trás-os-Montes e Alto Douro, 5000-801 Vila Real, Portugal.

<sup>a</sup>ajaj@utad.pt, <sup>b</sup>mspf@utad.pt, <sup>c</sup>anas@utad.pt

**Keywords:** Bio-wastes, Olive Stone, Almond Shell, Thermal Performance, Sustainability.

**Abstract.** The increase in the quality-of-life requirements of modern society and the rapid urbanization have resulted in harmful actions on the environment, contributing to the increase of energy consumption, greenhouse gases emissions and scarcity of resources. In addition, the high production of wastes resulting from different activities is also a concern and looking for alternative ways of waste valorization is urgent. The high contribution of the construction sector to the increase of energy consumption, solid waste production and CO<sub>2</sub> emissions is forcing companies to rethink their strategies in developing more sustainable and eco-efficient solutions in the perspective of circular economy. Thus, the valorization of wastes resulting from different industries is currently a challenge for the scientific community. Several studies have been developed in order to analyze the potential use of agroforestry by-products and wastes as building materials components. However, the high amount of wastes and their variability, undergoing or not transformation processes, justifies more research work in this field. Taking this into consideration, the utilization of two agroforestry wastes for building materials purposes was investigated. Almond shell wastes (ASW) and olive stone wastes (OSW) are analyzed as possible aggregates to be incorporated in the manufacturing of particleboards with 20 mm of thickness using polyvinyl acetate as binder. A multilayer solution was considered adding a 13 mm plasterboard to the ASW and OSW particleboards. The results show that the multilayer solution with the ASW particleboard can lead to a thermal performance improvement of 41% when compared to the incorporation of OSW.

### Introduction

The increase in the quality-of-life requirements of modern society and the rapid urbanization have resulted in harmful actions on the environment, contributing to the increase of energy consumption, greenhouse gases emissions and scarcity of resources. In addition, the high amount of wastes resulting from the various activity sectors is also a concern, requiring urgent solutions for waste valorization. The important role of the construction industry to the increase of energy consumption, solid waste production and CO<sub>2</sub> emissions requires the development of more sustainable and eco-efficient solutions following the circular economy principles. Recovering wastes and by-products resulting from the various economic activities can be an important contribution in pursuing European targets in this field. In this context, several studies emerged in order to evaluate the potential application of different wastes and by-products as building materials components. A special attention has been given to agro-wastes, whether or not subjected to transformation processes. Different agricultural wastes and by-products, such as sugarcane bagasse, banana leaves ashes, bamboo leaf, jute fiber, groundnut shell, wooden mill waste, coconut, rice husk, cotton stalk, among other, have been investigated as components of bricks, particleboards, acoustic, insulation and reinforcement materials [1-13]. However, the high amount of wastes and their variability,

undergoing or not transformation processes, justifies more research work in this field. In this research work, the potential valorization of wastes resulting from almond and olive oil production will be highlighted. Research work was developed concerning the use of almond shell in wood-based composites [14,15] and as concrete coarse aggregates [16], and in what concerns to the utilization of olive production waste, the few studies found in the literature referred to its incorporation in the production of blocks [17,18].

Regarding almond production, more than 3 200 000 tons of almonds are produced worldwide each year. United States of America is the largest producer, resulting in approximately 2 000 000 tons per year, followed by Spain with about 200 000 tons [19]. Portugal went from 8 713 tons, in 2016, to 37 900, in 2021, and for the year 2030, production is expected to be 50 000 tons [20].

With regard to the olive production, around 72 0000 tons of olive was produced in Portugal, during 2020, resulting in approximately 57 0000 tons of wet bagasse, extracted from olive stone centrifugation [21,22].

In this context, it is intended with this research work to analyze the feasibility of incorporating almond shell and olive stone wastes as building materials components.

## Materials and methods

In this section, the main characteristics of the studied wastes will be presented. The manufacturing of the particleboards and the experimental procedure for their thermal performance assessment will also be described.

**Characterization of wastes.** As referred previously, the potential utilization of wastes and by-products resulting from agriculture activities will be evaluated as raw-materials for building materials purposes. Almond shell and olive stone residues will be analyzed as possible aggregates to be incorporated in the manufacturing of particleboards.

**Almond Shell Wastes (ASW).** The almond shell residues (ASW) under study, Fig. 1b), was supplied by producers from the region of Trás-os-Montes and Alto Douro. Its elementary chemical characterization was carried out revealing that it is mostly composed of carbon and oxygen. Its density was also determined and a value of 355.93 kg/m<sup>3</sup> was obtained. The particle size distribution used to be incorporated in the particleboard varies between 4-16 mm and no crushing was applied to the original residue.

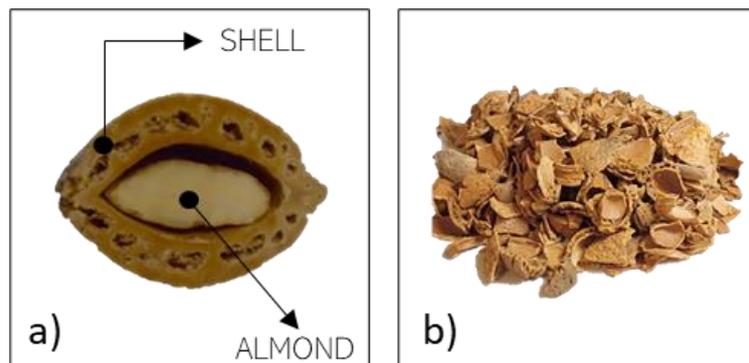


Figure 1: a) Almond cross section; b) Almond shell wastes (ASW)

**Olive Stone Wastes (OSW).** The olive stone wastes (OSW) used in this investigation was provided by *Cooperativa Agrícola Sabodouro*, located in Mogadouro, Northeast of Portugal. Part of the olive stone is used as biomass for water heating during the extraction stage, while the rest is sold. In Fig, it is possible to observe a cross section of the fruit and the resulting olive stone after milling. The OSW presents a density value of 673.66 Kg/m<sup>3</sup> and a particle dimension distribution between 1mm and 2 mm. In what concerns to its chemical composition, an elemental analysis revealed that it is manly composed by oxygen and carbon, as verified for the ASW.

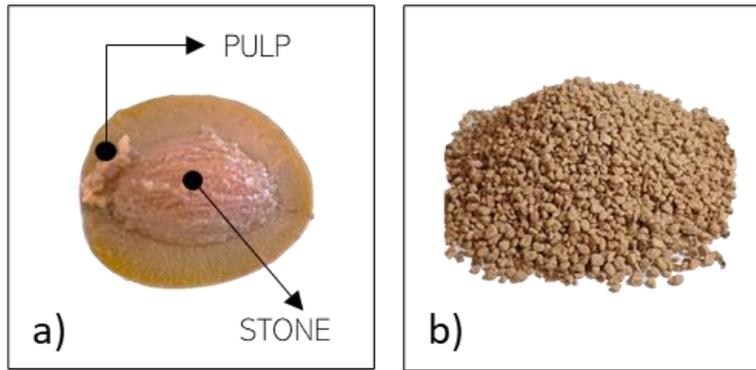


Figure 2: a) Olive fruit cross section; b) Olive stone wastes (OSW)

**Preparation of the particleboards.** ASW and OSW were incorporated in the production of two different particleboards. For the preparation of the mixtures, it was used: Polyvinyl acetate (PVA), an aqueous solvent, with a density of  $1240.00 \text{ Kg/m}^3$ , water resistance class D2 and pH 6-8; ASW with a density of  $355.93 \text{ kg/m}^3$ ; and OSW with a density of  $673.66 \text{ Kg/m}^3$ . A mixture was prepared for each type of waste according to Fig.

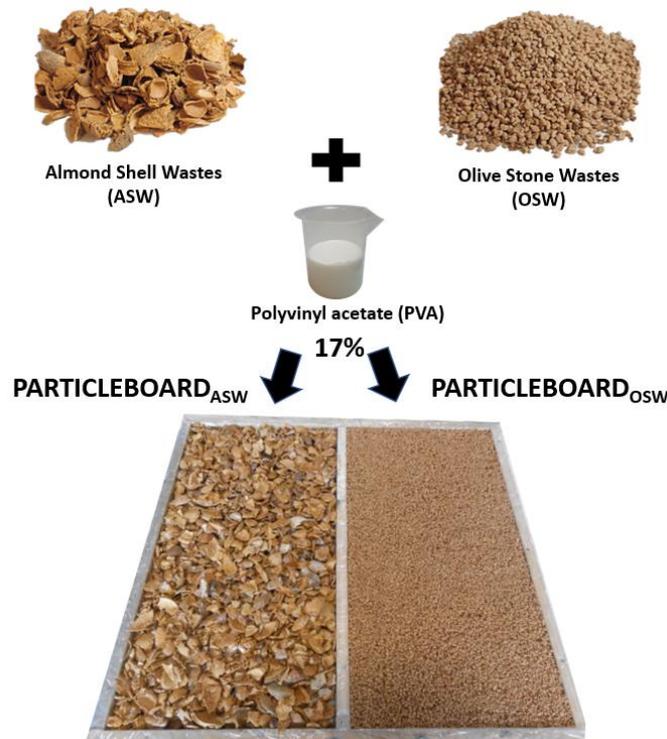


Figure 3: Schematic representation of the particleboard's preparation

The composition of the mixtures used to produce the two particleboards are presented in Table 1. After mixing, plastic-coated wooden molds with the dimensions of  $20 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 400 \text{ mm}$  were used to obtain the ASW and OSW particleboards (Fig). Twelve samples were prepared for each residue, one of which was considered for the thermal behavior tests. The samples were removed from the molds after two days of curing and stored in the laboratory, subject to indoor ambient conditions, for 30 days.

Table 1: Composition of the particleboard's mixtures [g]

Particleboards	PVA	ASW	OSW
ASW	170.00	1000.00	-
OSW	170.00	-	1000.00

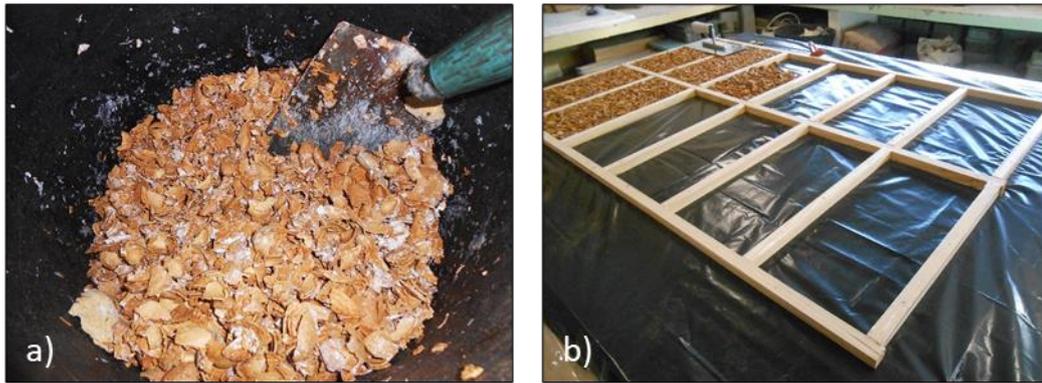


Figure 4: Preparation of the particleboards samples: a) Mixing process; b) Placement in the molds

As a preliminary investigation, 2 cm thick particleboards were defined, which proved to be effective for subsequent thermal analysis, in the case of the residues resulting from the olive stone. However, with regard to the almond shell residues, given the dimensional irregularity of the particles, a significant volume of voids was detected in the manufactured ASW particleboard. Therefore, to proceed with the thermal behavior experimental tests, a multilayer solution was considered, adding a plasterboard with 13 mm of thickness to the ASW and OSW particleboards, as it can be seen in the exterior view of the experimental setup presented in Fig 5.

### Thermal performance assessment

**Experimental setup.** As referred previously, a multilayer panel was considered for the thermal performance evaluation of the two particleboard solutions. The experimental procedure was carried out according to ISO 9869 [23], Pereira [24] e Leitão *et al* [25]. The two particleboard solutions were placed on the northern façade of a temperature-controlled test room with dimensions of 4.00 m × 3.00 m × 2.54 m, as presented in Fig. 5. Each sample was fixed to the wall using extruded polystyrene (XPS) boards and surrounded by polyurethane foam (PU) to avoid thermal bridges, non-insulated headers and other faults. Regarding the placement of the multilayer panel, the face containing the ASW and the OSW particleboards was turned inside (Fig. 5a)) while the plasterboard layer was in contact with the external environment (Fig. 5b)).

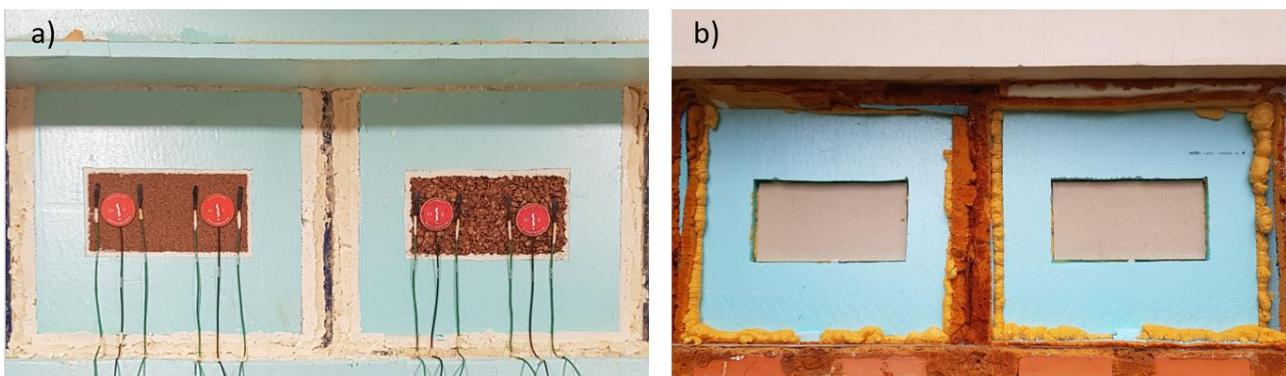


Figure 5: Experimental setup for the thermal performance assessment: a) interior view; b) exterior view

The experimental equipment was composed of two heat flux sensors,  $HF_1$  and  $HF_2$ , and four inner surface temperature sensors,  $Tsi_{11}$ ,  $Tsi_{12}$ ,  $Tsi_{21}$ , and  $Tsi_{22}$  fixed in the inner surface of each particleboard, Fig. 6. Two temperature sensors were also used to measure the temperature inside the test room ( $T_i$ ) and the temperature of the external environment ( $T_e$ ).

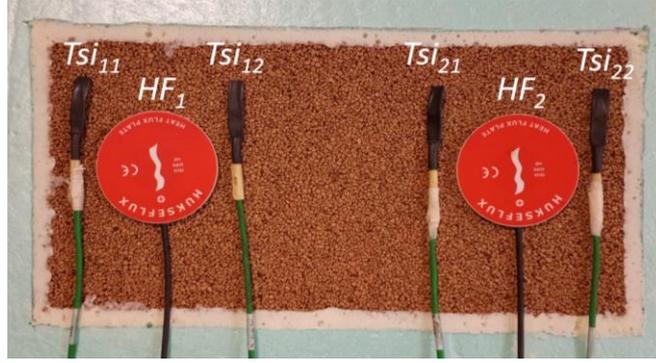


Figure 6: Sensor's location in the OSW particleboard: Heat flux sensors  $HF_1$  and  $HF_2$ ; Inner surface temperature sensors  $Tsi_{11}$ ,  $Tsi_{12}$ ,  $Tsi_{21}$ , and  $Tsi_{22}$

According to ISO 9869 [30], a high thermal gradient between indoor and outdoor environments is desirable to guarantee a significant heat flow, always occurring in the same direction across the sample under analysis. In this particular case, these conditions were achieved heating the test room and lower oscillation patterns of temperature values were guaranteed during the measurement period, which occurred between the 15<sup>th</sup> and the 30<sup>th</sup> of September. This experimental setup allowed monitoring the variation of different variables that characterizes the thermal behaviour of the two panels solutions. The temperatures of the internal and external environments ( $Ti(n)$  and  $Te(n)$ ), the heat flux ( $q1(n)$  and  $q2(n)$ ) and the inner surface temperatures ( $Tsi(n)$ ) were continuously acquired with 10 minutes intervals ( $n$ ) during the considered measurement period.

**Calculation methodology.** The data obtained experimentally allowed to estimate the thermal transmission coefficient ( $U$ ) of the ASW and OSW particleboards solutions, given the heat flow that occurs through the sample when subjected to a temperature differential, as defined in Eq. (1), [23]:

$$U(ntotal) = \frac{\sum_{n=1}^{ntotal} q(n)}{\sum_{n=1}^{ntotal} (Ti(n) - Te(n))} \quad (1)$$

where  $q(n)$  is the heat flow across the sample for the instant  $n$ , measured by the heat flux sensors  $HF_1$  and  $HF_2$ ;  $Ti(n)$  and  $Te(n)$  are the temperature inside and outside the test room, in the instant  $n$ , respectively;  $ntotal$  is the total number of instants acquired during the measurement period. According to ISO 9869 [23], it is recommended to use the values of the interior and exterior temperatures instead of the inner surface temperatures for the  $U$  value calculation. Given that two heat flux sensors were placed in each particleboard, two  $U$  values were estimated for each sample, by applying Eq. (1), defined as  $U1(ntotal)$  and  $U2(ntotal)$ . The thermal transmission coefficient of each particleboard solution,  $U(ntotal)$ , is the average value resulting from  $U1(ntotal)$  and  $U2(ntotal)$ , as presented in Eq. (2).

$$U(ntotal) = \frac{U1(ntotal) + U2(ntotal)}{2} \quad (2)$$

## Results and discussion

As referred previously, indoor and outdoor conditions were monitored during the experimental tests, allowing to obtain the variation of  $Ti$  and  $Te$  values. In Fig. 7, it is possible to observe that the temperature inside the test room was higher than the ones obtained outside during the measurement period, guaranteeing the heat flow from the interior to the exterior environments, as required for the experimental test reliability.

The stabilization of the interior temperature values was also guaranteed, as much as possible, as required by the experimental procedure, except between the 20<sup>th</sup> and the 21<sup>st</sup> September where an increase of  $Ti$  values were verified, which could be due to an uncontrolled change in the

heating device. However, this change took place during a very short period of time compared to the total measurement period, not influencing the reliability of the results. An average value around 34°C was achieved for the interior temperature. Regarding the exterior temperature, a minimum value of 9.6°C and a maximum of 29.2°C was achieved, resulting in an average value of 18.8°C. Ensuring the temperature differential between the two environments, the heat flux variation curves were determined for both particleboards solutions as presented in Fig.9.

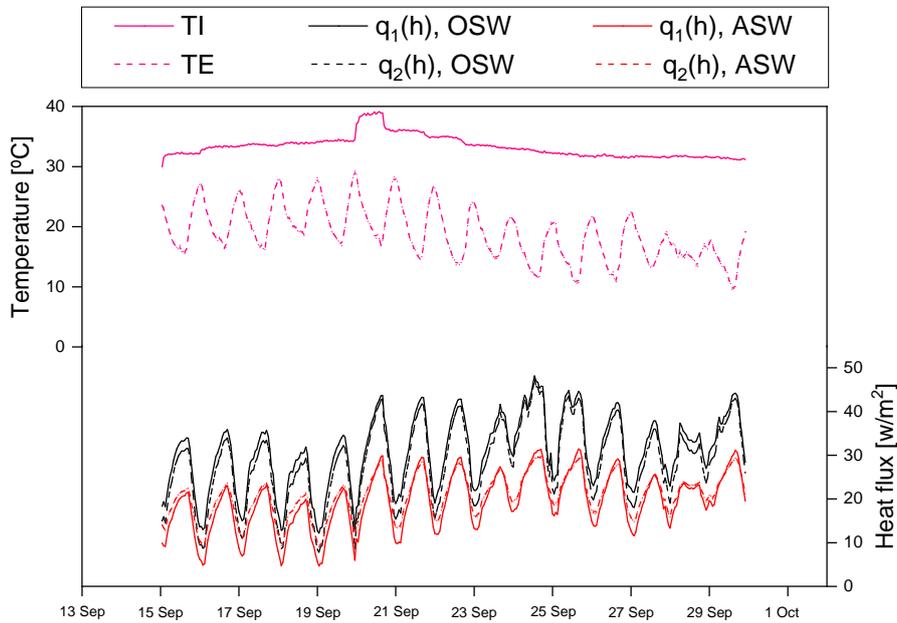


Figure 7: Variation of interior temperature ( $T_i$ ), exterior temperature ( $T_e$ ) and heat flux ( $q_i$ ) values

A global analysis allows to verify that the multilayer solution with the ASW particleboard presented lower heat flux values when compared to the OSW multilayer solution. In what concerns to the heat flux values, the solution with ASW presented a minimum value of 3.9 W/m<sup>2</sup> and a maximum of 32.6 W/m<sup>2</sup>, while these values were 5.3 W/m<sup>2</sup> and 49.5 W/m<sup>2</sup>, respectively, for the OSW particleboard. An average increase in the heat flux values of approximately 42 % is verified in the OSW case when compared to the ASW solution. It should be noted that both solutions are composed of a plasterboard to which the waste particleboards were added, demonstrating the impact of each particleboard in the thermal performance of the multilayer solution. A higher number of empty spaces was identified in the ASW particleboard while in the case of OSW, the particleboard showed a greater degree of compactness and a higher density. These characterizes may justify the differences in the heat flux values, supported by the values obtained for the inner surface temperatures (see Fig.8), where higher temperature values are observed in the ASW particleboard surface.

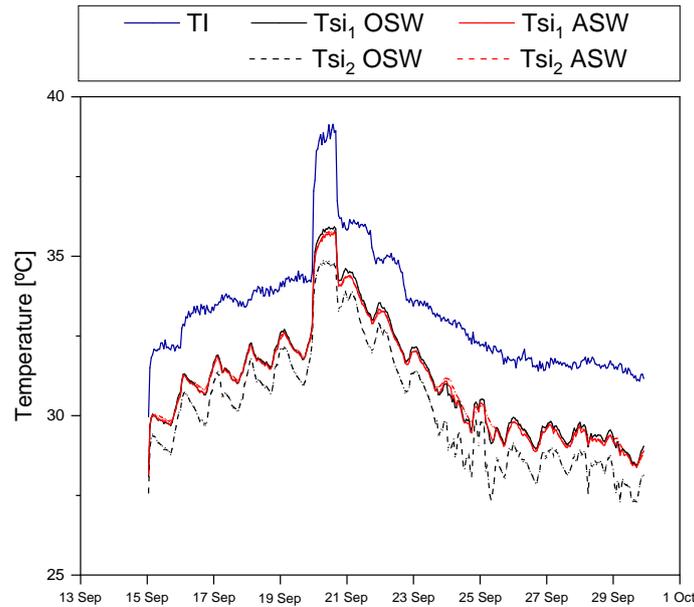


Figure 8: Variation of interior temperature (Ti) and inner surface temperatures (Tsi) values

In order to estimate the thermal transmission coefficient of the multilayer solutions, Eqs. (1) and (2) were applied for the ASW and OSW cases. The variation of  $U$  values during the measurement period is presented in Fig. 9. It can be observed that the solution with the ASW particleboard presented lower values when compared to the OSW. According to Eq. (2),  $U'$  values of  $1.50 \text{ W/m}^2\text{°C}$  and  $2.12 \text{ W/m}^2\text{°C}$  are estimated for the ASW and the OSW solutions, respectively. The results show that adding a 20 mm ASW particleboard to the plasterboard with 13 mm can lead to a thermal performance improvement of 41% when compared to the incorporation of OSW.

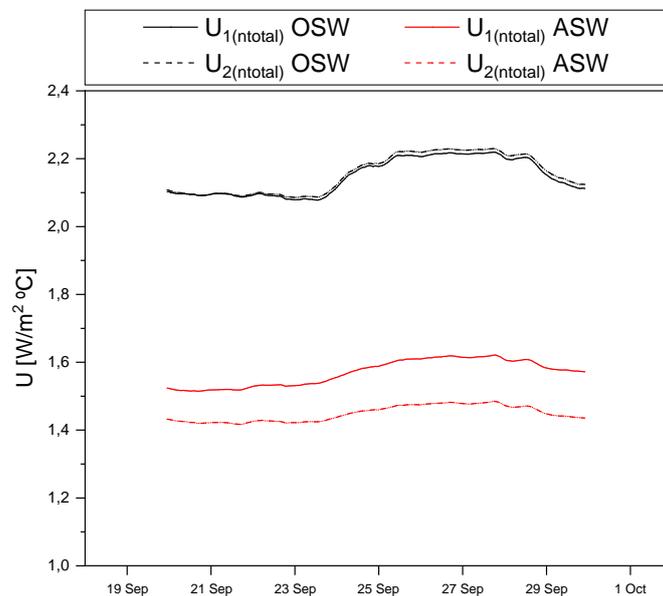


Figure 9: Variation of the thermal transmission coefficient ( $U$ )

## Conclusions

The high contribution of the construction sector to the increase of energy consumption, solid waste production and  $\text{CO}_2$  emissions requires the development of more sustainable and eco-efficient solutions in the perspective of circular economy. Recovering wastes and by-products originated in the various sectors of activity can be an important contribution in pursuing European targets in this field. In this context, the potential utilization of wastes and by-products resulting from agriculture activities was evaluated as raw-materials for building materials purposes. Almond

shell and olive stone residues were analyzed as possible aggregates to be incorporated in the manufacturing of particleboards using polyvinyl acetate as binder. An experimental analysis on the thermal performance of a multilayer panel solution incorporating the mentioned wastes was performed allowing to acquire the heat flux and the inner surface temperatures values for each particleboard solution. The thermal transmission coefficient was also estimated. Although this is a preliminary study, it can be observed the suitability of the studied wastes to be incorporated as particleboards for building materials purposes. The results also suggest that it is possible to obtain particleboards with integrity and dimensional stability, capable of being fixed to other materials and easily integrated into multilayer construction elements. Regarding the thermal performance tests, it was observed that adding the ASW particleboard to the multilayer solution with plasterboard lead to lower heat flux values when compared to OSW. Accordingly, higher temperatures values were registered in the ASW particleboard inner surface. Values of 1.50 W/m<sup>2</sup>°C and 2.12 W/m<sup>2</sup>°C were estimated for the thermal transmission coefficient of the ASW and OSW panel solutions. These preliminary results indicate that these wastes may be promising for coating applications, so further studies are suggested concerning mixtures optimization, particle size distribution and geometry. A more in-depth study on the chemical and physical properties of almond and olive residues, as well as the mechanical, thermal, acoustic and durability properties of the originated bio-based composites, is required to identify the most suitable applications.

### 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] 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.
- [2] C. Maraveas, *Production of Sustainable Construction Materials Using Agro-Wastes*, Materials 13, (2020) 262.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] N.B. Singh, V. D. Singh, S. Rai, *Hydration of bagasse ash-blended portland cement*, Cement and Concret Research, 30 (2000) 1485-1488.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] K. Ghavami, *Bamboo as reinforcement in structural concrete elements*, Cement and Concrete Composites, 27 (2005) 637-649.
- [11] Y. Li, Y. Mai, L. Ye, *Sisal fibre and its composites: a review of recent developments*, Composites Science and Technology, 60 (2000) 2037-2055.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] H. Pirayesh and A. Khazaeian, *Using almond (Prunus amygdalus L.) shell as a bio-waste resource in wood-based composite*, Composites Part B: Engineering, 43 (2012) 1475-1479.
- [15] H. Pirayesh, H. Khanjanzadeh and A. Salari, *Effect of using walnut/almond shells on the physical, mechanical properties and formaldehyde emission of particleboard*, Composites Part B: Engineering, 45 (2013) 858-863.
- [16] M. F. Hama, *Almond Shell as Coarse Aggregate Replacement in concrete*, Research square, (2022) 1376621/v1.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] A. Big, *Atlas Big*, [Online]. Available: <https://www.atlasbig.com/pt-pt/paises-por-producao-de-amendoa>. [Accessed May 2022].
- [20] D. A. Doll, J. Freire de Andrade and P. Serrano, *Produção de amêndoa em Portugal, Tendências de plantação e desafios de produção num setor em desenvolvimento.*, Artigo Técnico Agro.Ges, p. 10, março 2021.
- [21] PORDATA, <https://www.pordata.pt/>, em 27/12/2021.
- [22] C. Silva, *Aplicación directa de residuos de almazaras de dos fases en un olivar con riego localizado: Efectos en las propiedades edáficas y el cultivo*, (2009).
- [23] ISO 9869, *Thermal Insulation – Building Elements – In-situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance*, International Organization for Standardization (ISO), 1994.
- [24] Cunha, S.: *In situ evaluation and certification of the thermal quality of residential buildings*, PhD Thesis, UTAD, Vila Real, Portugal, 2011.

- [25] D. Leitão, J. Barbosa, E. Soares, T. Miranda, N. Cristelo, and A. Briga-Sá, *Thermal performance assessment of masonry made of ICEB's stabilised with alkali-activated fly ash*, *Energy and Buildings*, 139 (2017) 44-52.

## Estudo de formulações de argamassas para sistemas de pavimento radiante com incorporação de agregado siderúrgico

FIGUEIRA Adriana<sup>1,a</sup>, REBELO Filipe<sup>1,b</sup>, PAIVA Helena<sup>1,c</sup>, FIGUEIREDO António<sup>1,d</sup>, ALMEIDA Ricardo<sup>2,3,e</sup>, VICENTE Romeu<sup>1,f</sup>, FERREIRA Victor<sup>1,g</sup>

<sup>1</sup>RISCO, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193, Aveiro, Portugal

<sup>2</sup>Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Viseu, Campus Politécnico de Repeses, 3504-510, Viseu, Portugal

<sup>3</sup>CONSTRUCT-LFC, Faculdade de Engenharia (FEUP), Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, 4200-465, Porto, Portugal

<sup>a</sup>adrianamargarida@ua.pt, <sup>b</sup>filiperebelo@ua.pt, <sup>c</sup>hpaiva@ua.pt, <sup>d</sup>ajfigueiredo@ua.pt, <sup>e</sup>ralmeida@estgv.ipv.pt, <sup>f</sup>romvic@ua.pt, <sup>g</sup>victorf@ua.pt

**Palavras-chave:** Pavimento Radiante, Argamassas, Resíduo Siderúrgico, Transferência de Calor.

**Resumo.** Considerando as metas europeias para a eficiência energética e descarbonização, sem comprometer o conforto térmico, é necessário definir soluções de climatização mais eficientes e sustentáveis, nas vertentes da conceção, do uso de materiais e ainda da eficiência de sistemas. A melhoria das propriedades térmicas das argamassas utilizadas nos sistemas de pavimento radiante é uma estratégia promissora para o aumento da eficiência térmica e energética destes sistemas que têm ganho quota de mercado não só no norte e centro da Europa, bem como na América do Norte. A eficiência térmica e energética dos sistemas de pavimento radiante hidráulicos é dependente da geometria e constituição das camadas, dos materiais empregues e das condições de operação, tendo grande impacto as propriedades termofísicas da argamassa utilizada para envolver as tubagens. Numa perspetiva de valorização de um resíduo industrial como contributo específico para a sustentabilidade na construção, é objeto de estudo deste trabalho a incorporação de um Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC) como substituto parcial do agregado natural de uma argamassa fluída autonivelante para melhorar o seu desempenho em sistemas de pavimento radiante. Para além da caracterização térmica e mecânica de argamassas com diferentes teores de ASIC, o desempenho das argamassas neste tipo de aplicação foi também aferido através de um modelo numérico calibrado.

### Introdução

O consumo de energia elétrica usada para a climatização de edifícios tem vindo a aumentar e, para o minimizar sem comprometer o conforto dos utentes, é essencial intensificar a investigação sobre estratégias de aquecimento e arrefecimento passivos, bem como o desenvolvimento de novos materiais e soluções construtivas com menor impacto ambiental e energia incorporada [1, 2].

Os sistemas de pavimento radiante são uma resposta à necessidade da evolução dos edifícios com maior eficiência energética, promovendo uma distribuição uniforme da temperatura ambiente e oferecendo a oportunidade de aplicar recursos de elevada eficiência energética como, por exemplo, o aproveitamento solar, uma vez que quando instalados em conjunto com os sistemas de pavimento radiante permitem economizar cerca de 60% de energia para o seu funcionamento [3, 4].

A utilização de resíduos como matérias-primas alternativas tem vindo a aumentar, tornando-se bastante importante na ótica da sustentabilidade na construção ao permitirem a redução da extração e utilização de agregados naturais em diversos materiais de construção. Existem na literatura muitos exemplos de diversas aplicações de resíduos de diferentes proveniências, mas destacam-se aqui alguns exemplos de valorização de resíduos da indústria metalúrgica. Foram utilizados vários tipos

de resíduos de escórias metalúrgicas para aplicação em argamassas, em substituição quer do ligante como dos agregados. Santamaría et al., (2020) [5] estudaram a incorporação de escórias de forno a arco elétrico (EAFS) como agregado e escórias de forno de panela de alta sílica (LFS), onde substituíram 30% de ligante e 70% de agregado fino, tendo verificado que a densidade das argamassas com agregado de EAFS aumentou cerca de 11% bem como a sua resistência mecânica. Já em relação à substituição apenas dos agregados das argamassas Ozturk et al., (2018) [6], assim como outros autores [7-10], aplicaram escórias de forno a arco elétrico em argamassas cimentícias, alcançando um aumento da resistência mecânica à flexão e à compressão de cerca de 30% e 18%, respetivamente, quando incorporaram 40% daquele resíduo. Neste trabalho procurou-se usar um outro resíduo siderúrgico (ASIC) resultante da produção do aço, com o intuito de, por via da sua maior densidade, melhorar a transmissão térmica das argamassas usadas na envolvente dos pavimentos radiantes.

## Metodologia experimental

**Materiais.** Os materiais utilizados neste estudo foram os seguintes: cimento, agregados naturais, agregado siderúrgico, água, redutor e retentor de água. O cimento e os agregados naturais foram fornecidos pela empresa *Saint-Gobain Portugal, S.A.* e o Agregado Siderúrgico Inerte para a Construção (ASIC) foi proveniente da empresa SN Maia (grupo MEGASA) através da empresa *Harsco Environmental*.

O cimento utilizado nas argamassas foi um cimento tipo CEM II/A-L 42.5 R. Os agregados naturais são duas areias com diferentes granulometrias, em que o agregado mais fino é um filler e o agregado de dimensão média é uma areia siliciosa e, por fim, contém ainda um agregado calcário mais grosso com dimensões entre 1.5 e 3.0 mm, com massas volúmicas de, respetivamente, 2660, 2600 e 2700 kg/m<sup>3</sup>. O ASIC é proveniente de um resíduo da indústria do aço com uma massa volúmica de 3480 kg/m<sup>3</sup>. A água utilizada foi a da rede de consumo e, em termos de adjuvantes nas formulações, foi usado um agente redutor de água, com base num éter policarboxilato com a função de melhorar o espalhamento e um agente retentor de água, cuja substância base é o hidroxipropilmetilcelulose, tendo este último a função de evitar a perda de água em substratos porosos e absorventes.

**Procedimentos.** O estudo realizado tem como principal objetivo o desenvolvimento de argamassas com incorporação de um resíduo siderúrgico para aplicação em sistemas de pavimentos radiantes. Neste contexto, o plano experimental tomou duas linhas de ação. A primeira, ao nível dos materiais, que consistiu no desenvolvimento de argamassas e sua avaliação no estado fresco e no estado endurecido, sendo o alvo de estudo formulações cuja incorporação do ASIC foi realizada em substituição total do agregado médio e em substituição total do agregado médio e grosso (Tabela 1). Foi desenvolvida uma formulação de referência, denominada de AR, e posteriormente, duas formulações com incorporação de diferentes teores de resíduo siderúrgico, as quais foram avaliadas ao nível das suas características. No estado fresco foi determinada a consistência por espalhamento, e no estado endurecido foi avaliada a densidade, a resistência mecânica e, por fim, a condutibilidade térmica. Na segunda linha de ação, foram utilizados em estudos de simulação numérica os resultados obtidos na fase experimental, para se avaliar o comportamento térmico das argamassas desenvolvidas quando aplicadas num sistema de pavimento radiante hidráulico. Para tal foi usado o *software FEMIX* num modelo anteriormente calibrado e validado [11].

Tabela 1: Formulações desenvolvidas

Denominação	Cimento	Filler	Agregado Médio	Agregado Grosso Calcário	ASIC	Água	Agente Redutor de água (SP)	Agente Retentor de água (EC)
AR	15%	35%	35%	15%	0%	9%	0%	0%
A35ASIC	15%	35%	0%	15%	35%	9%	0%	0%
A35ASIC_11W1.5SP0.08EC	15%	35%	0%	15%	35%	11%	1.5%	0.08%
A35ASIC_13W	15%	35%	0%	15%	35%	13%	0%	0%
A50ASIC	15%	35%	0%	0%	50%	9%	0%	0%
A50ASIC_11W1.5SP0.08EC	15%	35%	0%	0%	50%	11%	1.5%	0.08%
A50ASIC_13W	15%	35%	0%	0%	50%	13%	0%	0%

Os ensaios realizados seguiram as normas vigentes. No caso do ensaio da consistência por espalhamento seguiu-se o especificado pela norma europeia EN 1015-3 [12]. Após a produção das argamassas, foram moldados os provetes de ensaio com dimensões de  $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$  e acondicionados em câmara climática a  $20^\circ\text{C}$  e 95% de humidade relativa durante 28 dias, após os quais se seguiram os ensaios no estado endurecido, nomeadamente, a densidade determinada segundo a norma europeia EN 1015-10 [13], a resistência mecânica à flexão e à compressão, segundo a norma europeia EN 1015-11 [14] e, por fim, a condutibilidade térmica foi determinada em provetes de forma circular, com diâmetro de 50 mm e espessura de 15 mm, com recurso ao equipamento Holometrix C-Matic (modelo TCA-200).

De seguida, para avaliação do impacto da incorporação do agregado siderúrgico na camada de enchimento, foi realizada uma simulação numérica, cujo *software* (FEMIX) recorre ao Método dos Elementos Finitos e se desenvolve segundo a forma geral, em coordenadas cartesianas tridimensionais, pela equação da transferência de calor.

Na presente simulação, foram utilizadas temperaturas prescritas para simular a temperatura da água e a condição de convecção na superfície superior da laje. Para as condições de teste, foi definido que a temperatura do ar é de  $18^\circ\text{C}$  e que o sistema de circulação de água funciona durante 6 horas contínuas, em que a temperatura da água aumenta de forma progressiva até aos  $45^\circ\text{C}$ , com início aos  $20^\circ\text{C}$ , conforme se mostra na Figura 1.

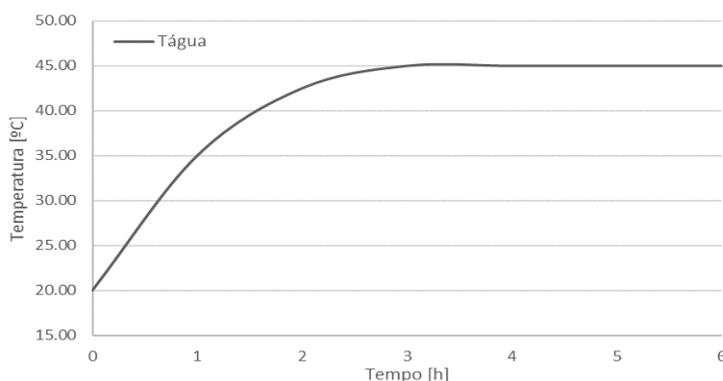


Figura 1: Perfil da temperatura da água

## Resultados e discussão

A Tabela 2 apresenta os resultados experimentais das formulações desenvolvidas a partir da argamassa de referência (AR). Duas formulações distintas foram desenvolvidas neste estudo preliminar, uma com 35% de ASIC a substituir o agregado médio (areia siliciosa) e outra em que se aumentou a quantidade do resíduo ASIC (para 50%) por substituição do agregado grosso calcário para além do agregado médio. Em ambos os sistemas foram também feitas formulações com maior teor de água e de adjuvantes para melhorar o comportamento no estado fresco sem comprometer as propriedades no estado endurecido. Estas formulações estão descritas detalhadamente na Tabela 1.

Como se pode ver na Tabela 2, as argamassas formuladas inicialmente com o teor base de água da argamassa de referência (de apenas 9%) não apresentam trabalhabilidade adequada para o fim a que se propõe, ou seja, a aplicação em sistemas de pavimento radiante. Por esse motivo, foi necessário aumentar o teor de água e de adjuvantes para que o espalhamento aumentasse de forma a provocar um bom envolvimento das tubagens do pavimento radiante.

Tabela 2: Resultados laboratoriais obtidos

Denominação	Espalhamento [mm]	Massa volúmica [kg/m <sup>3</sup> ]	Resistência à flexão [MPa]	Resistência à compressão [MPa]	Condutibilidade térmica [W/m.K]
AR	100	2029 ± 17.5	4.0 ± 0.1	19.3 ± 0.5	0.71 ± 0.05
A35ASIC	100	2325 ± 10.7	5.8 ± 0.1	26.6 ± 1.0	0.75 ± 0.02
A35ASIC_11W1.5SP0.08EC	160	2258 ± 10.0	5.3 ± 0.2	17.9 ± 0.3	0.75 ± 0.14
A35ASIC_13W	200	2305 ± 5.3	4.4 ± 0.1	16.2 ± 0.7	0.87 ± 0.02
A50ASIC	100	2359 ± 8.8	4.9 ± 0.1	23.2 ± 0.3	0.74 ± 0.01
A50ASIC_11W1.5SP0.08EC	140	2306 ± 179.3	5.0 ± 0.0	19.1 ± 0.2	0.66 ± 0.05
A50ASIC_13W	210	2389 ± 18.3	4.4 ± 0.3	19.2 ± 0.8	0.77 ± 0.06

De facto, a introdução de teores mais elevados de água e a introdução dos agentes redutor e retentor de água leva a um aumento progressivo da consistência por espalhamento (para 160 a 200 mm). Por outro lado, em relação à densidade, comparando as amostras com 9% de água, esta aumenta com o aumento do teor de agregado denso nas misturas, devido à elevada densidade do agregado ASIC. No entanto, ao contrário da trabalhabilidade, com o aumento do teor de água e adjuvantes, a densidade de cada mistura diminui. Mais especificamente, as argamassas com adjuvantes na sua constituição apresentam uma densidade inferior em comparação com as restantes formulações, que é explicado pelo facto de no caso das argamassas com adjuvantes poderem promover a introdução de ar na matriz, que provoca uma diminuição na densidade das misturas, obtendo-se todavia materiais mais trabalháveis [10, 15]. A amostra A50ASIC é uma exceção que, com 13% de água, a sua densidade é a mais elevada, devido ao grande conteúdo de um agregado de densidade superior, o ASIC.

Relativamente à resistência mecânica, focando nas formulações com 9% de água, apesar de o aumento do teor de ASIC nas misturas apresentar um aumento da densidade das mesmas, neste caso, o facto de a mistura A35ASIC conter ainda teor de agregado grosso calcário o que já não sucede na mistura A50ASIC, faz com que o empacotamento da matriz seja diferente em relação à referência (AR), e se traduza num valor 31% e 27% superior na resistência mecânica à flexão e à compressão, respetivamente. Em relação à amostra A50ASIC, o aumento relativo à referência AR é de apenas 15% e 13%, respetivamente. Julga-se que este efeito pode ser explicado pela combinação do agregado calcário e do agregado siderúrgico na matriz. Ainda em relação à resistência mecânica, para todas as formulações desenvolvidas, a resistência diminuiu ligeiramente mas não de forma significativa com o aumento progressivo de água e adjuvantes que causou um aumento considerável do espalhamento destas argamassas.

Por fim, a condutibilidade térmica das argamassas cujo teor de água é 9%, aumenta com a maior incorporação do teor de resíduo siderúrgico. Por outro lado, quando se aumenta o teor de água e se incorpora adjuvantes, o mesmo não acontece. Uma vez que a condutibilidade depende da densidade e da porosidade da matriz, não sendo uma relação linear, ao incorporar maior percentagem de ASIC, a densidade da amostra global irá aumentar. No entanto, pode não significar um aumento de condutibilidade térmica, uma vez que o aumento do teor de ASIC poderá também conduzir a um aumento da porosidade da matriz criada por dificuldades de empacotamento e consequente diminuição da condutibilidade térmica.

Após os resultados laboratoriais obtidos, foram selecionadas as formulações que teriam uma melhor relação entre todas as propriedades analisadas, e as suas características foram introduzidas no modelo numérico, bem como os restantes materiais utilizados na simulação (ver Tabela 3).

Sucintamente, o modelo foi utilizado para avaliar o impacto da utilização de uma argamassa, considerada de referência e outras formulações estudadas na distribuição das temperaturas à superfície.

Tabela 3: Propriedades dos materiais utilizados no modelo

Material	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Condutibilidade térmica [W/m.K]	Calor específico [J/kg.K]
Argamassa AR	2029	0.71	800
Argamassa A35ASIC_13W	2305	0.87	800
Argamassa A50ASIC_13W	2389	0.77	800
Material de Isolamento	2500	2.00	1000
Betão	70.5	0.04	1000

Os resultados obtidos mostraram que a incorporação de agregado siderúrgico ASIC na camada de argamassa provoca um aumento da temperatura superficial atingida, e desse modo, afeta positivamente a eficiência dos sistemas de pavimento radiante. A Figura 2 representa a distribuição da temperatura superficial do pavimento, para as diferentes formulações de argamassa utilizada.

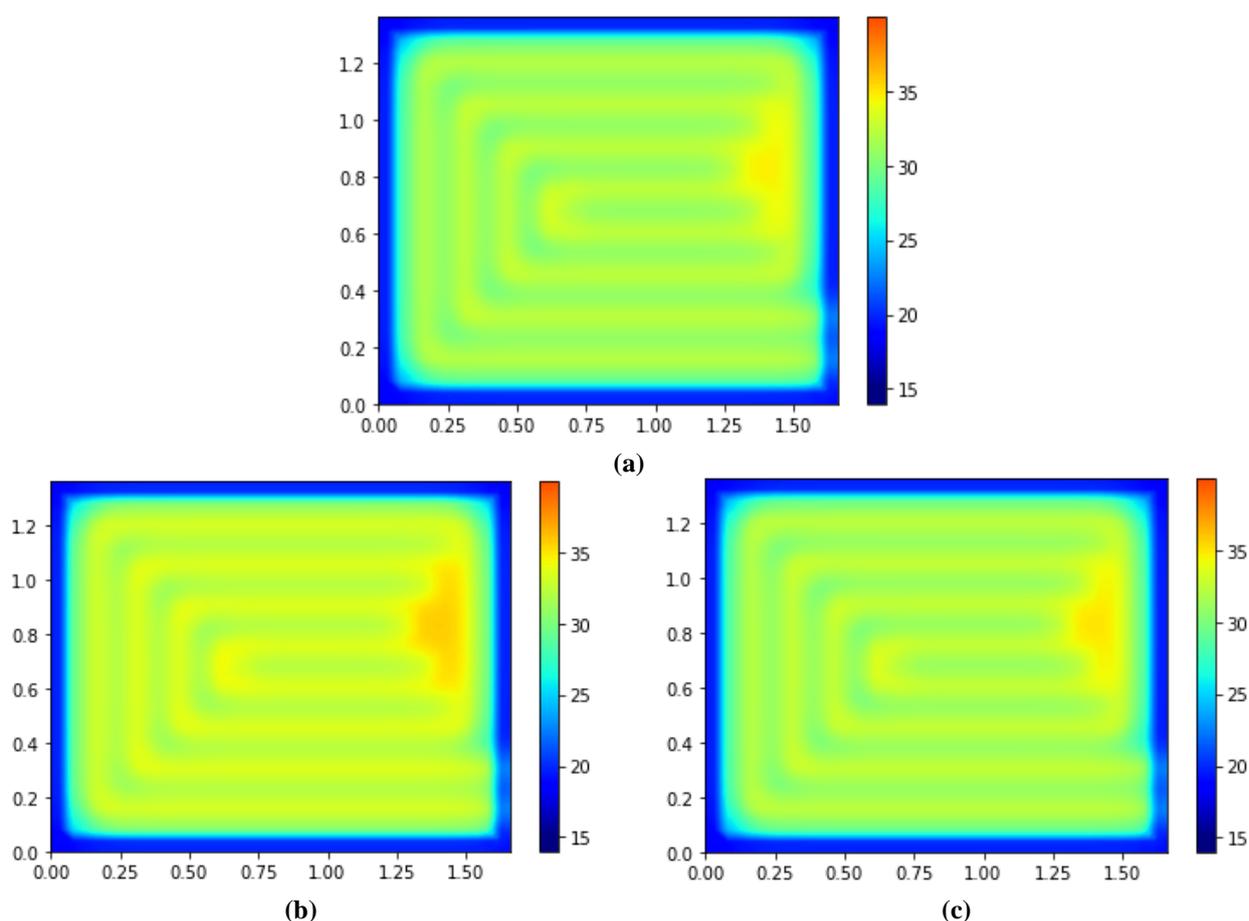


Figura 2: Distribuição da temperatura na superfície do pavimento radiante para diferentes formulações de argamassas: (a) Argamassa de referência; (b) A35ASIC\_13W; (c) A50ASIC\_13W

A Figura 3 representa o perfil da evolução da temperatura superficial para diferentes formulações de argamassa. Pela análise dos resultados a argamassa com a condutibilidade térmica mais elevada, resulta consequentemente numa transferência de temperatura para a superfície também mais elevada. A temperatura máxima atingida pelo sistema de pavimento radiante com argamassa A35ASIC\_13W atingiu o valor de 35.77°C. No caso da argamassa de referência e a argamassa A50ASIC\_13W, as temperaturas máximas atingidas à superfície foram, respetivamente, 34.64°C e 34.99°C.

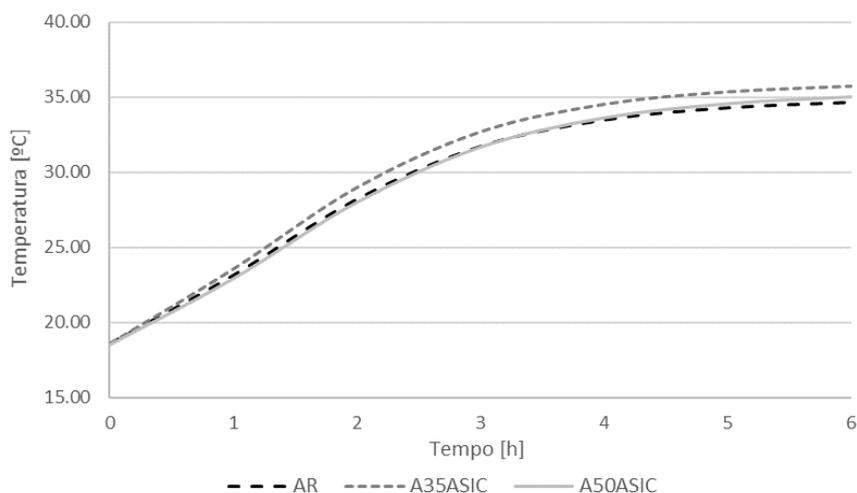


Figura 3: Perfil da temperatura à superfície do pavimento para diferentes formulações de argamassa

A utilização de uma argamassa com 35% de agregado siderúrgico e 13% de água na sua constituição, apresentou-se como a mais vantajosa em termos de temperatura à superfície e, consequentemente, na eficiência térmica dos pavimentos, na medida que poderá conduzir a um tempo de operação mais reduzido. Esta formulação também apresentou um maior crescimento da temperatura à medida que o sistema de aquecimento de água está em funcionamento, sempre com temperaturas mais elevadas à superfície ao longo do tempo de aquecimento de 6 horas. O contrário acontece na formulação da argamassa sem agregado siderúrgico e com 50% deste agregado denso, em que, até às 3 horas de funcionamento, a introdução do agregado denso não aparenta contribuir para uma temperatura à superfície mais elevada. Após as 3 horas de funcionamento do sistema e quando a temperatura da água já circula a 45°C, a argamassa com 50% de ASIC provoca no sistema de pavimento radiante maiores temperaturas à superfície do que a argamassa de referência, no entanto, esta diferença registada é, no máximo, de 1%.

## Conclusões

Este trabalho teve como principal objetivo o desenvolvimento e caracterização de formulações de argamassas com incorporação de resíduo siderúrgico como agregado e posterior simulação numérica do desempenho térmico de um sistema de pavimento radiante com as diferentes formulações desenvolvidas, para efeitos de comparação e avaliação do efeito do agregado denso na camada de enchimento do sistema na temperatura superficial do mesmo.

A densidade e a resistência mecânica das argamassas aumentaram com o acréscimo de incorporação do agregado denso ASIC nas formulações, para uma mesma quantidade de água. Por outro lado, a adição de mais água e de adjuvantes, apesar de aumentar a consistência por espalhamento, fator favorável ao tipo de aplicação aqui em causa, conduz a uma diminuição, embora ligeira, da densidade e da resistência mecânica à flexão e à compressão, pelo aumento da porosidade interna da matriz.

Em relação à condutibilidade térmica, um maior teor de agregado denso não representa automaticamente um aumento desta característica, uma vez que existe um balanço entre o aumento de densidade trazido pela incorporação de um agregado mais denso (ASIC) na mistura, que pode ser contrariado pelo efeito da sua introdução induzir uma matriz mais porosa pelo empacotamento gerado, que acaba por contribuir para o ligeiro decréscimo da condutibilidade térmica.

As melhores formulações foram testadas numericamente num sistema de pavimento radiante, obtendo-se, para a amostra com maior condutibilidade térmica, um aumento de cerca de 1°C na temperatura superficial, durante as 6 horas de funcionamento do sistema. A argamassa com 35% de agregado siderúrgico e com 13% de água foi a que apresentou o melhor desempenho térmico. Concluiu-se assim que é possível obter uma argamassa com este agregado siderúrgico (ASIC) com

desempenho térmico melhorado e sem comprometer a trabalhabilidade e a resistência mecânica para este tipo de aplicação em pavimentos radiantes.

## Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro do projeto Super Energy Radiant Floor Systems – SEERFloor, PTDC/ECI-COM/3436/2020.

## Referências

- [1] J. Lee, S. Wi, S. G. Jeong, S. J. Chang, e S. Kim, *Development of thermal enhanced n-octadecane/porous nano carbon-based materials using 3-step filtered vacuum impregnation method*, *Thermochim. Acta*, vol. 655, n. January, (2017) 194–201 doi: 10.1016/j.tca.2017.06.013.
- [2] R. Vicente e T. Silva, *Brick masonry walls with PCM macrocapsules: An experimental approach*, *Appl. Therm. Eng.*, vol. 67, n. 1–2, (2014) 24–34, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.02.069.
- [3] G. Zhou e J. He, *Thermal performance of a radiant floor heating system with different heat storage materials and heating pipes*, *Appl. Energy*, vol. 138, (2015) 648–660, doi: 10.1016/j.apenergy.2014.10.058.
- [4] V. Echarri-Iribarren, C. Rizo-Maestre, e J. L. Sanjuan-Palermo, *Underfloor heating using ceramic thermal panels and solar thermal panels in public buildings in the Mediterranean: Energy savings and healthy indoor environment*, *Appl. Sci.*, vol. 9, n. 10, (2019) 1–18, doi: 10.3390/app9102089.
- [5] A. Santamaría, J. J. González, M. M. Losáñez, M. Skaf, e V. Ortega-López, *The design of self-compacting structural mortar containing steelmaking slags as aggregate*, *Cem. Concr. Compos.*, (2020) vol. 111, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2020.103627.
- [6] M. Ozturk, O. Akgol, U. K. Sevim, M. Karaaslan, M. Demirci, e E. Unal, *Experimental work on mechanical, electromagnetic and microwave shielding effectiveness properties of mortar containing electric arc furnace slag*, *Constr. Build. Mater.*, vol. 165, (2018) 58–63, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.01.031.
- [7] H. Y. Wang, W. C. Wang, J. C. Wang, e Y. W. Chen, *Evaluation of the engineering properties and durability of mortar produced using ground granulated blast-furnace slag and stainless steel reduced slag*, *Constr. Build. Mater.*, vol. 280, (2021) 122498, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.122498.
- [8] M. Baawain, H. Shoukry, e K. Al-Jabri, *An Investigation into the Thermo-Physical, Mechanical, and Microstructural Properties of Cement Mortar Incorporating Hybrid Waste Slags*, *Int. J. Civ. Eng.*, vol. 19, n. 1, (2021) 17–26, doi: 10.1007/s40999-020-00554-z.
- [9] J. Castro Mendes, R. R. Barreto, V. de Freitas Vilaça, A. V. Lopes, H. A. de Souza, e R. A. F. Peixoto, *Coating mortars based on mining and industrial residues*, *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 22, n. 5, (2020) 1569–1586, doi: 10.1007/s10163-020-01051-0.
- [10] I. Santamaría-Vicario, A. Rodríguez, C. Junco, S. Gutiérrez-González, e V. Calderón, *Durability behavior of steelmaking slag masonry mortars*, *Mater. Des.*, vol. 97, (2016) 307–315, doi: 10.1016/j.matdes.2016.02.080.
- [11] R. M. S. F. Almeida et al., *Experimental and Numerical Simulation of a Radiant Floor System: The Impact of Different Screed Mortars and Floor Finishings*, *Materials (Basel)*, vol. 15, (2022) n. 3, doi: 10.3390/ma15031015.

- [12]CEN: European Committee for Standardization, EN 1015-3: 1998 - Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table). p. 9, 1998.
- [13]CEN: European Committee for Standardization, EN 1015-10:1999 - Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar. 1999, p. 8.
- [14]CEN: European Committee for Standardization, EN 1015-11:1999 - Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar. p. 15, 1999.
- [15]I. Santamaría-Vicario, A. Rodríguez, S. Gutiérrez-González, e V. Calderón, *Design of masonry mortars fabricated concurrently with different steel slag aggregates*, Constr. Build. Mater., vol. 95, (2015) 197–206, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.07.164.

## Argamassas de revestimento com resíduos industriais

BELLEI Poliana<sup>1,a</sup>, VELOSO Julio<sup>2</sup>, FLORES-COLEN Inês<sup>3</sup>, PACHECO João<sup>4</sup>, MENDES Maria Paula<sup>5</sup> e TORRES Isabel<sup>6,7</sup>

<sup>1,2,3,4,5</sup>CERIS, IST, Universidade de Lisboa, Avenida Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisboa, Portugal

<sup>4c5</sup>Lab – Sustainable Materials Association, Edifício Central Park, Rua Central Park 6, 2795-242  
Linda-a-Velha, Portugal

<sup>6</sup>Universidade de Coimbra, CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Rua Luis Reis dos Santos  
290, 3030-790, Coimbra, Portugal

<sup>7</sup>Itecons, Rua Pedro Hispano, 3030-289, Coimbra, Portugal.

<sup>a</sup>poliana.bellei@tecnico.ulisboa.pt

**Palavras-chave:** Argamassa de Cal Hidráulica, Resíduos de Construção e Demolição, Casca de Ostra, Máscara.

**Resumo.** A reciclagem de resíduos produzidos pelas mais diversas indústrias permite a diminuição do impacto ambiental originado pela sua deposição em aterro. O objetivo desta investigação foi a análise das propriedades de argamassas de cal hidráulica natural com diferentes resíduos industriais: construção e demolição, aquicultura e resíduos plásticos de polipropileno (máscaras cirúrgicas descartáveis IIR). Foram realizados ensaios de caracterização dos materiais utilizados, e das argamassas produzidas. O comportamento das argamassas com introdução dos diversos resíduos/agregados reciclados foi comparado com o comportamento de uma argamassa de referência. No estado fresco foram avaliados os parâmetros de consistência e massa volúmica. Já no estado endurecido foi avaliada a resistência à compressão, através de ensaios destrutivos. Após análise dos resultados obtidos, é possível afirmar que as argamassas de cal hidráulica natural com agregado reciclado de casca de ostra e agregado reciclado de construção e demolição, não apresentaram diferenças significativas em relação à argamassa referência. No caso do agregado reciclado de construção e demolição, as argamassas obtiveram resistências mecânicas mais elevadas. O resíduo de máscara é o composto que mais altera as propriedades da argamassa devido às suas características de absorção de água e baixa densidade. Entre as vantagens de reciclar resíduos estão a diminuição da extração de matéria-prima e de custos com deposição em aterro, redução dos gases com efeito de estufa e diminuição do impacto ambiental provocado pela deposição indevida de resíduos nos solos, promovendo-se a economia circular.

### Introdução

Diante da crescente compreensão das questões sustentáveis e económicas dos produtos do setor da economia circular, o comportamento de materiais de construção com incorporação de resíduos de diferentes industriais tem vindo a ser investigado. A utilização desses resíduos visa contribuir para a implantação de novos produtos de construção, contribuindo para a redução da utilização dos recursos naturais existentes e para a diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> e da contaminação do solo e da água.

Em Portugal, atualmente os Operadores de Gestão de Resíduos (OGR), não produzem agregado reciclado certificado para uso em materiais cimentícios (argamassa e betão), focando-se na receção de resíduos de construção e demolição e no seu processamento em agregados para aplicações de menor exigência - como operações de enchimento e agregados para pavimentação [1]. A estratégia europeia para a circularidade da construção, referida no Pacto Ecológico Europeu [2] e desenvolvida no Plano de Ação para a Economia Circular [3] da União Europeia que promove o uso

de agregados reciclados de construção em aplicações de maior valor, como o betão e a argamassa e motiva o desenvolvimento de estudos em materiais cimentícios com a utilização deste material.

A produção em aquicultura de Portugal aumentou em 2019, comparativamente ao ano de 2018. A espécie produzida em maior quantidade entre os moluscos foi a amêijoia, seguida da ostra e do mexilhão. No caso da ostra, a sua concha é um resíduo que provoca impactes ambientais se não for recuperada, e seu descarte ilegal acontece todos os anos em milhares de toneladas [4]. Alguns estudos abrangem a utilização da concha de ostra em misturas de argamassas de revestimento [5-7] e na produção de betão [8-10]. O uso de cascas de moluscos em materiais de construção pode, portanto, contribuir para uma construção mais sustentável.

Além dos desafios enfrentados pela população mundial no âmbito da saúde, os aspetos económicos, sociais e ambientais também foram afetados devido à ocorrência da pandemia de COVID-19. O descarte diário de milhões de máscaras cirúrgicas, um resíduo derivado da indústria do plástico, apresenta grave ameaça para diferentes ecossistemas, e provoca o aumento de gases com efeito de estufa como o metano e o etileno [11]. Para tentar minimizar essas ameaças a indústria da construção tem reutilizado esse resíduo na composição de betões e argamassas [12-16]. Com a facilidade de recolha destes resíduos e motivado pela possibilidade da sua valorização em novos produtos de construção, este estudo tem como objecto investigar o desempenho de argamassas de revestimento de cal hidráulica, após a incorporação de resíduos da indústria da construção, aquicultura e plástico produzidos em Portugal. A melhoria do comportamento das argamassas utilizando resíduos de diferentes indústrias gera valor económico, menor consumo dos recursos naturais existentes, redução da poluição, e contribui para a sustentabilidade da indústria da construção.

## **Materiais e métodos**

O ligante utilizado para produzir a argamassa foi a Cal Hidráulica Natural NHL 3,5 indicada para a produção de argamassas de revestimento em edifícios antigos ou obra nova. Os resíduos utilizados foram recolhidos de diferentes indústrias. O resíduo de construção e demolição foi fornecido por dois Operadores de Gestão de Resíduos (OGR) da zona de Lisboa (denominados Agregado reciclado A e Agregado reciclado B neste estudo). Estes resíduos são recebidos pelos OGR e, através de separação preliminar, britagem (no caso de um dos operadores) e classificação granulométrica, são processados em agregados reciclados. Em relação ao resíduo produzido pela indústria da aquicultura, foi adquirida concha de ostra com uma granulometria já reduzida numa loja de animais. Após a compra, as conchas foram lavadas e trituradas novamente para reduzir ainda mais sua granulometria. Tanto o agregado reciclado, como a concha de ostra passaram pelo peneiro de 2 mm anteriormente à sua utilização na composição das argamassas. Já o agregado natural possuiu granulometria corrente. Por fim, foram recolhidas e trituradas máscaras de proteção individual IIR já utilizadas, que representaram a indústria do plástico. A areia utilizada foi comprada calibrada, sendo composta por diferentes tipos: APAS 14, APAS 30, APAS 60 e FPS120. Os diferentes tipos de resíduos estudados podem ser visualizados na Figura 1.



Figura 1: Materiais reutilizados – a) agregado reciclado de construção; b) concha de ostra; c) máscara

Em relação à campanha experimental, foram analisadas as areias e os resíduos finos que contribuíram para o fabrico das várias composições das argamassas estudadas. Para o ensaio de massa volúmica do material impermeável das partículas e absorção de água, adotaram-se os procedimentos da norma NP-EN 1097-6 [17]. Apresentam-se na Tabela 1 os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do agregado natural, agregado reciclado de construção, concha de ostra e máscara.

Tabela 1: Caracterização dos agregados

Material	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	Absorção de água (%)
Agregado natural	2615	0,5
Agregado reciclado A	2219	8,5
Agregado reciclado B	2542	9,7
Agregado de concha de ostra	2537	3
Agregado de máscara	280	114,4

A partir dos resultados obtidos, observa-se que as fibras de máscara possuem um valor relativamente baixo de massa volúmica, indicando que a substituição de outros componentes das argamassas por este resíduo poderá alterar significativamente, entre outros, os valores de resistência mecânica. Nota-se também que o resíduo apresenta uma elevada absorção de água, o que afeta a quantidade de água necessária para manter as características de trabalhabilidade e tempo de presa das argamassas. É importante evidenciar as dificuldades encontradas em delimitar um processo para obter o resíduo saturado com superfície seca, já que a técnica para agregados não se aplica a este resíduo. Por isso, a máscara triturada foi utilizada na condição seca e saturada, quando incorporada na mistura da argamassa.

A concha de ostra foi o material que apresentou a absorção de água mais semelhante ao agregado natural, 3% e 0,5% respetivamente. Em relação à massa volúmica, o valor apresentado foi 3% menor quando comparado ao valor encontrado para o agregado natural.

Após o ensaio de massa volúmica e absorção de água foi possível constatar que o agregado B possui uma massa volúmica 15% maior que o agregado reciclado A. Ainda, a absorção de água deste último, é 13% inferior à do primeiro. Em comparação com os agregados reciclados, o agregado natural tem absorção de água bastante inferior e densidade superior. Estes resultados são consensuais no estado-da-arte [18].

No caso da avaliação das propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido foram realizados os ensaios que constam na Tabela 2.

Tabela 2: Ensaios nas argamassas produzidas

Ensaio	Propriedade	Norma
Estado fresco	Consistência	EN 1015-3 [19]
	Massa volúmica	EN 1015-6 [20]
Estado endurecido	Resistência à compressão	EN 1015-11 [21]

A produção da argamassa realizou-se de acordo com a EN 1015-2 [22] e o traço utilizado foi de 1:3, em volume, de cal hidráulica:areia, de acordo com o estudo realizado por Bellei, et al. [23]. Seguidamente foram executados ensaios no estado fresco e foram moldados provetes, para a avaliação as suas características de resistências à compressão, através de ensaios destrutivos no estado endurecido. As argamassas produzidas e sua identificação estão descritas na Tabela 3.

Tabela 3: Identificação e composições das argamassas

Legenda*	Massa ligante (g)	Massa de agregado calibrado (g)	Massa de material reciclado (g)	Massa de água total (ml)	Relação água/ligante
ARG REF	420	2520	-	374	0,9
ARG ARA_50%	420	1260	1260	493	1,2
ARG ARA_100%	420	-	2520	565	1,3
ARG ARB_50%	420	1260	1260	506	1,2
ARG ARB_100%	420	-	2520	613	1,4
ARG CO_50%	420	1260	1260	462	1,1
ARG MS_2,5%	150	877,5	22,5	225	1,5
ARG MS_5%	150	855	45	300	2,0
ARG MH_2,5%	150	877,5	22,5	165	1,1
ARG MH_5%	150	855	45	195	1,3

\*Legenda: ARG REF: argamassa referência, ARG ARA\_50%: argamassa com 50 % de substituição de agregado reciclado do fornecedor A, ARG ARA\_100%: argamassa com 100 % de substituição de agregado reciclado do fornecedor A, ARG ARB\_50%: argamassa com 50 % de substituição de agregado reciclado do fornecedor B, ARG ARB\_100%: argamassa com 100 % de substituição de agregado reciclado do fornecedor B, ARG CO\_50%: argamassa com 50 % de substituição de agregado de concha de ostra, ARG MS\_2,5%: argamassa com 2,5 % de substituição de agregado de máscara seca, ARG MS\_5%: argamassa com 5 % de substituição de agregado de máscara seca, ARG MH\_2,5%: argamassa com 2,5 % de substituição de agregado de máscara húmida, ARG MH\_5%: argamassa com 5 % de substituição de agregado de máscara húmida.

O procedimento de cura de todos os provetes obedeceu às condições referidas na EN 1015-11 [21], tendo os provetes sido armazenados em câmara húmida a 20 °C e 95 % de HR durante 7 dias e os restantes dias até à data de ensaio em câmara seca a 20 °C e 65 % HR. Os ensaios no estado endurecido foram realizados quando completados 28 dias de idade.

Seguidamente, apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios de caracterização das argamassas, quer para o estado fresco, bem como para os provetes ensaiados no estado endurecido.

## Resultados e discussões

**Argamassa no estado fresco.** Após a produção da argamassa de cal hidráulica, foi possível medir o seu espalhamento e determinar sua massa volúmica conforme Tabela 4.

Tabela 4: Caracterização no estado fresco

Legenda	Massa volúmica (kg/m <sup>3</sup> )	Consistência (mm)
ARG REF	2164	181
ARG ARA_50%	2060	180
ARG ARA_100%	1920	179
ARG ARB_50%	1960	180
ARG ARB_100%	1900	179
ARG CO_50%	2080	184
ARG MS_2,5%	1968	185
ARG MS_5%	1677	150
ARG MH_2,5%	1887	185
ARG MH_5%	1651	149

O espalhamento obtido em todas as argamassas com agregado reciclado de construção foi semelhante. Porém, para atingir estes parâmetros, conforme observado na Tabela 3, a quantidade de água total foi aumentada quando se incorporou agregado reciclado de construção. Foi possível observar que o agregado reciclado de construção fornecido pela empresa B necessitou de maior quantidade de água total, quando comparado ao fornecedor A, devido a maior quantidade de finos presente no agregado reciclado B. As misturas de argamassas com 50% de substituição do agregado

calibrado pelo agregado reciclado de construção consumiram, basicamente, quase o dobro da quantidade de água, ambos em relação a argamassa referência.

No caso das argamassas produzidas com 50% de substituição do agregado natural pelo resíduo de concha de ostra (ARG CO\_50%) percebe-se que a quantidade de água necessária foi igual a argamassa ARG ARA\_50% e ARG MH\_2,5%, ou seja, equivalente a 16% a mais da água do traço referência. A quantidade de água utilizada foi a que mais se aproxima da utilizada na argamassa referência, com o objetivo de manter a mesma trabalhabilidade.

Para as argamassas de cal hidráulica com substituição do agregado pelo resíduo de máscara, as argamassas ARG MS\_2,5% e ARG MH\_2,5% tiveram espalhamento adequado pela norma [19]. Por outro lado, quando se aumenta a incorporação para 5% de máscara, o espalhamento reduz significativamente, mesmo com aumento da quantidade de água. No intuito de atingir um resultado mais próximo ao sugerido na norma, realizou-se a tentativa de adicionar mais água às argamassas com 5% de resíduo, porém obteve-se evidente excesso de água e alterações na homogeneidade da mistura. Desta forma, do ponto de vista da trabalhabilidade, para se manter um comportamento satisfatório para incorporações acima de 5%, seria recomendado utilizar aditivos, como por exemplo, um plastificante. Neste caso, deve-se ter atenção aos possíveis aumentos da porosidade e redução da resistência mecânica destas argamassas [24].

No geral, o espalhamento das argamassas produzidas está de acordo com os parâmetros recomendados pela norma EN 1015-3 ( $175 \pm 10$  mm para massa volúmica superior a  $1200 \text{ kg/m}^3$ ) [19].

Como se pode observar, o resultado da massa volúmica para a argamassa referência ( $2164 \text{ kg/m}^3$ ) foi maior, em relação às outras argamassas. Pode-se constatar que a argamassa produzida com 50 % de concha de ostra (ARG CO\_50%) em substituição ao agregado natural possuiu o valor que mais se aproxima da argamassa referência apresentando um valor 4% inferior ( $2080 \text{ kg/m}^3$ ). A argamassa que possuiu menor valor de massa volúmica foi a argamassa ARG MH\_5% ( $1651 \text{ kg/m}^3$ ).

Apesar do agregado reciclado de construção do fornecedor B apresentar maior massa volúmica, as argamassas produzidas com este agregado obtiveram uma maior relação água/ligante na mistura, em comparação com as argamassas produzidas com agregado reciclado do fornecedor A. Isso pode ser a causa da menor massa volúmica apresentada pelas argamassas produzidas com este tipo de agregado reciclado de construção, quando comparadas com as argamassas produzidas com o agregado reciclado do fornecedor A.

A maior necessidade de água na mistura com a incorporação dos agregados reciclado de construção do fornecedor B poderá estar relacionada com o processo de produção dos agregados: o agregado reciclado de construção do fornecedor A é produzido com britagem em britador de impacto, enquanto que o agregado reciclado de construção do fornecedor B é produzido unicamente por separação granulométrica em *trommel* [25], o que resulta na produção de agregados reciclados de construção com geometria alongada. Geometrias alongadas estão associadas a maiores necessidades de água [26].

Todas as argamassas que tiveram incorporação do resíduo de máscara saturado apresentaram valores de massa volúmica menores do que as argamassas com a mesma taxa de incorporação de resíduo seco. Estas reduções foram tanto maiores quanto maior foi a taxa de incorporação de resíduo. É, igualmente, possível notar que o resíduo na condição saturada tem maior influência nesta redução para estas argamassas. Foram observados valores de queda percentual da massa volúmica na ordem de 10 % para 2,5 % de resíduo, e 20 % para argamassas com 5 % de resíduo incorporado.

**Argamassa no estado endurecido.** Para o estado endurecido foi registada a resistência à compressão das argamassas, conforme representado na Tabela 5.

Tabela 5: Caracterização no estado fresco

Legenda	Média (N/mm <sup>2</sup> )
ARG REF	0,88
ARG ARA_50%	1,58
ARG ARA_100%	1,62
ARG ARB_50%	1,44
ARG ARB_100%	1,44
ARG CO_50%	0,88
ARG MS_2,5%	0,53
ARG MS_5%	0,24
ARG MH_2,5%	0,43
ARG MH_5%	0,18

Em relação aos ensaios à compressão, as constatações foram de que os agregados reciclados de construção contribuíram para aumentar a resistências das argamassas de cal hidráulica natural, pois todas as argamassas que possuíam este tipo de material na composição apresentaram resultados maiores que a argamassa referência. Apesar desses valores, essas argamassas apresentaram maiores quantidades de água na mistura. Os resultados foram maiores para as argamassas que utilizaram o agregado reciclado do fornecedor A.

A argamassa produzida com resíduo de concha de ostra em substituição de 50 % do agregado natural demonstrou o mesmo desempenho quando comparado à ARG REF (0,88 MPa). Neste caso, a concha de ostra demonstra potencial para ser utilizada como um subproduto na composição de argamassas, por demonstrar comportamentos semelhantes a argamassas referência [27].

A partir dos resultados obtidos, nota-se uma redução da resistência à compressão para todas as argamassas com resíduo de máscara, em relação a referência. Tal redução é mais acentuada nas argamassas com incorporação do resíduo saturado. Quando se substitui o resíduo pelo agregado, notam-se quedas maiores de resistência, cerca de 40 % para ARG MS\_2,5%, e 51 % para ARG MH\_2,5%, embora ambas as argamassas ainda possuam resistência aceitável para a classe CS-i, considerando os parâmetros definidos pela CEN-EN 998 [27]. Já as argamassas ARG MS\_5% e ARG MH\_5% não satisfazem os limites estipulados pela norma.

## Conclusão

O objetivo geral desta investigação foi a análise das propriedades de argamassas de cal hidráulica natural com resíduos de diferentes origens: construção e demolição, aquicultura e plástico derivado do petróleo. Para isso foram realizados ensaios de caracterização dos materiais, e produzidos dez traços diferentes de argamassas.

Foram constatadas algumas tendências em relação às argamassas produzidas, como uma maior quantidade de água consumida pelas argamassas que utilizaram os resíduos em substituição ao agregado natural. Por outro lado, as argamassas de cal hidráulica natural que tiveram na sua composição os agregados reciclados de construção, obtiveram resultados mais elevados de resistência à compressão. Ainda, o agregado reciclado do fornecedor B foi o material que apresentou maior massa volúmica e absorção de água, quando comparado ao fornecedor A, bem como maior resistência à compressão comparado as demais misturas produzidas.

Quando incorporado o resíduo de concha de ostra na mistura, a resistência à compressão da respectiva argamassa foi idêntica à da argamassa de referência, e assim como à resistência da argamassa com agregados reciclados de construção. Este material também possui potencial de ser explorado e incorporado, futuramente, nas misturas de argamassas de revestimento.

O resíduo de máscara é o compósito que mais altera as propriedades da argamassa devido às suas características de absorção de água e densidade. Conforme observado nos resultados expostos, observou-se uma redução da massa volúmica das argamassas no estado fresco ao se aumentar as

taxas de incorporação do resíduo, o que era esperado devido aos resultados dos ensaios de caracterização do resíduo. A consistência das argamassas também foi notavelmente alterada pela adição do resíduo, devido à grande absorção de água das fibras, levando à necessidade de se aumentar a quantidade de água nas argamassas com maiores quantidades de resíduo. Constatou-se que todas as argamassas com incorporação de resíduo de máscara apresentaram perda de resistência em relação à referência, principalmente nos casos em que este resíduo foi adicionado na condição saturada, entretanto, para algumas argamassas, esta perda não foi fator limitante para a sua utilização na construção (2,5 % de substituição).

Esta investigação, foi realizada no âmbito do projeto ReDuCe (resíduo de máscara), em parceria com o Laboratório da Construção do IST e o c<sup>5</sup>Lab. Procurou-se compreender e analisar o comportamento de argamassas de cal hidráulica natural produzidas com a incorporação de diferentes resíduos produzidos pela indústria da construção civil, aquicultura e plástico. Os resultados mostram as restrições e oportunidades que os resíduos apresentam para se obter uma argamassa que proporcione o maior ganho ambiental possível, no sentido de utilizar grandes porcentagens do resíduo reciclado. Para melhor compreensão dos efeitos destes resíduos nas argamassas, sugerem-se investigações que visem avaliar as possíveis causas das mudanças mais bruscas de comportamento e desenvolver soluções, com o uso de aditivos ou outros procedimentos, que permitam o uso do material reciclado na indústria da construção, em detrimento do seu descarte direto no ambiente.

## **Agradecimentos**

O estudo apresentado foi realizado no âmbito do projeto ReDuCe (1801P.01109) financiado pela Fundação Amélia de Mello, e atribuído em parceria com a BCSD Portugal, sendo o autor Julio Veloso financiado por este projeto (BL143/2021). Poliana Bellei agradece o financiamento da bolsa para doutoramento da Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia (UI/BD/151151/2021).

## **Referências**

- [1] J. Pacheco, J. de Brito, C. Chastre and L. Evangelista, *Bond of recycled coarse aggregate concrete: model uncertainty and reliability-based calibration of design equations*, Engineering Structures, (2021) 239: 112290.
- [2] COM/2019/640final, *Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões - Pacto Ecológico Europeu*. Comissão Europeia (2019).
- [3] COM/2020/98final, *Comunicação da Comissão ao Parlamento Europeu, ao Conselho, ao Comité Económico e Social Europeu e ao Comité das Regiões - Um novo Plano de Ação para a Economia Circular para uma Europa mais limpa e competitiva*. Comissão Europeia (2020).
- [4] H. Yoon, S. Park, K. Lee and J. Park, *Oyster shell as substitute for aggregate in mortar*, Waste Manage Re, v. 2, (2004) 158–170.
- [5] H. Ez-zak, A. Diouri, *Microstructural and physicomechanical properties of mortars-based dredged sediment*. Asian Journal of Civil Engineering, (2019) vol. 20.
- [6] D. Chen, P. Zhang, T. Pan, Y. Liao, H. Zhao, *Evaluation of the eco-friendly crushed waste oyster shell mortars containing supplementary cementitious materials*. Journal of Cleaner Production, v. 237, (117811), (2019) 15.
- [7] Y. Liao, J. Fan, R. Li, B. Da, D. Chen, Y. Zhang, *Influence of the usage of waste oyster shell powder on mechanical properties and durability of mortar*, Advanced Powder Technology, (2022) v. 33 (103503).

- [8] Q. Song, Q. Wang, S. Xu, J. Mao, X. Li, Y. Zhao, *Properties of water-repellent concrete mortar containing superhydrophobic oyster shell powder*, *Construction and Building Materials*, Volume 337, 27 (2022) 127423.
- [9] I. Horiguchi, Y. Mimura, P. J. M. Monteiro, *Plant-growing performance of pervious concrete containing crushed oyster shell aggregate*, *Cleaner Materials*, Volume 2, 15 (2021) 100027.
- [10] Y. Han, R. Lin, X. Wang. *Performance of sustainable concrete made from waste oyster shell powder and blast furnace slag*, *Journal of Building Engineering*, Volume 47, 15 (2022) 103918.
- [11] S. Royer, S. Ferroín, S. Wilson, D. Karl, *Production of methane and ethylene from plastic in the environment*, *PLoS ONE*, (2018) 13(8): e0200574.
- [12] S. Kilmartin-Lynch, M. Saberian, J. Li, R. Roychand, G. Zhang, *Preliminary evaluation of the feasibility of using polypropylene fibres from COVID-19 single-use face masks to improve the mechanical properties of concrete*, *Journal of Cleaner Production* (2021).
- [13] I. Gómez, J. De Brito, I. Flores-Colen, R. Vasco Silva, C. Rodríguez-Liñán, *Incorporación de residuos plásticos de elevada tasa de incorporación, en la fabricación de compuestos de yeso y su aplicación a produtos de la construcción*, *Relatório CERIS. Instituto Superior Técnico. Portugal*. (2020) 41.
- [14] M. Nili, V. Afroughsabet, *The effects of silica fume and polypropylene fibers on the impact resistance and mechanical properties of concrete*, *Construction and Building Materials*, (2010) 927-933, 24 (6).
- [15] M. Martínez-Lopez, G. Martínez-Barrera, R. Salgado-Delgado, *Recycling polypropylene and polyethylene wastes in production of polyester based polymer mortars*, *Construction and Building Materials*, 274 (2021).
- [16] M. Barbero-Barrera, N. Flores Medina, *The effect of polypropylene fibers on graphite-natural hydraulic lime pastes*, *Construction and Building Materials*, 591-601 (2018) 184.
- [17] NP EN 1097-6, *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados: Determinação da massa volúmica e da absorção de água*, IPQ, Lisboa (2003).
- [18] Pacheco, J. and J. de Brito, *Recycled aggregates produced from construction and demolition waste for structural concrete: constituents, properties and production*, *Materials* (2021) 14(19): 5748.
- [19] EN 1015-3, *Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*, CEN, Brussels (1999).
- [20] EN 1015-6, *Methods of test for mortar for masonry - Part 6: Determination of bulk density of fresh mortar*, CEN, Brussels (1998).
- [21] EN 1015-11, *Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*, CEN, Brussels (2019).
- [22] EN 1015-2, *Methods of test for mortar for masonry - Part 2: Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars*, Brussels: CEN (1998).
- [23] P. Bellei, I. Torres, I. Flores-Colen, R. Travincas, D. Silveira, *Study of cement mortars with different particle size sands after application to ceramic brick substrate*, *International conference. Construction, energy environment & sustainability*, Coimbra, Portugal (2021).
- [24] A. Mattana, M. Costa, *Estudo da influência de aditivo dispersante no comportamento reológico de argamassas de revestimento*, *Universidade Federal do Paraná* (2010).

- [25] c5Lab/WP10c/RA5 (2021). *Agregados para betão - Relatório 5: Operadores de gestão de resíduos: Procedimento tecnológico, recolha de amostras, selecção e avaliação preliminar de agregados grossos reciclados*. J. Pacheco, C. Cenci, A. Dias et al. Lisboa, Portugal, c5Lab.
- [26] M. Alexander and S. Mindess, *Aggregates in concrete*, New York, United States of America, Taylor & Francis (2005).
- [27] EN 998-1, Specification for mortar for masonry – Part 1: Rendering and plastering mortar, CEN, Brussels (2016).

## Um contributo para o estudo de betões de menor impacto ambiental

REIS Cristina<sup>1,2,a</sup>, ARAÚJO Daniela<sup>1,b</sup>, PINTO Jorge<sup>1,3,c</sup>

<sup>1</sup>DE, ECT, UTAD, Quinta de Prados, 5000-801 Vila Real, Portugal

<sup>2</sup>Construct, Inegi, FEUP, Portugal

<sup>3</sup>CMADE, UTAD, Portugal

<sup>a</sup>crisreis@utad.pt, <sup>b</sup>danimaraujo14@gmail.com, <sup>c</sup>tiago@utad.pt

**Palavras-chave:** Betão, Agregado, Material Lenhoso, Floresta, Sustentabilidade.

**Resumo.** Este trabalho de investigação pretende dar um contributo na temática da sustentabilidade na construção através da apresentação dos resultados preliminares alcançados num estudo de um betão alternativo de base cimentícia que ofereça maior leveza e que tenha uma pegada ecológica menor do que a de um betão estrutural tradicional. Neste caso, pretende-se substituir os agregados inertes tradicionais de maior dimensão (parcialmente ou totalmente) por um material lenhoso do tipo granulado de madeira. O processo de preparação deste agregado, a escolha da granulométrica mais adequada e a seleção da composição do betão, será alguma da informação a divulgar neste trabalho de investigação. A caracterização do betão a propor como material de construção também será abordada neste trabalho. Neste contexto, destaca-se a capacidade resistente à compressão, o tempo de secagem, a densidade e a resistência ao fogo como sendo algumas das propriedades materiais avaliadas deste tipo de betão. O fato de se potenciar a aplicação de material lenhoso no fabrico do betão poderá ter um interesse especial na valorização da floresta Portuguesa.

### Introdução

A busca de soluções mais sustentáveis tem sido uma prioridade em todos os quadrantes da nossa sociedade. No caso da indústria da construção civil também tem sido uma preocupação. A reutilização, a reciclagem, a economia circular, a desconstrução, a opção de soluções técnicas passivas, a utilização de materiais naturais e locais e a reabilitação têm sido algumas das opções adotadas para caminhar no sentido de uma indústria da construção mais amiga do ambiente.

A utilização de resíduos como materiais de construção tem despertado o interesse da comunidade científica [1] e [2].

A utilização de resíduos agrícolas e florestais no fabrico de materiais de construção de base cimentícia também tem sido outra linha de investigação interessante. Por exemplo, trabalhos focados na utilização de girassol [3], da casca de amendoim [4], da cana-de-açúcar [5], da casca de arroz [6], da cortiça [7] e do caroço da espiga de milho [8], têm vindo a ser desenvolvidos.

Neste trabalho de investigação, o enfoque consiste na utilização de resíduos de madeira da indústria da carpintaria no fabrico de betão. Pretende-se fabricar um betão com substituição do agregado tradicional pétreo por este resíduo e par situações em que a capacidade resistente à compressão não seja prioritário.

Deste modo, este artigo está estruturado da seguinte forma. Após esta introdução, será feita uma breve descrição dos materiais aplicados e da composição considerada no fabrico do betão à base de resíduo da madeira. Depois, informação sobre algumas propriedades materiais deste betão serão divulgadas. Destas propriedades materiais destacam-se, a densidade, a capacidade resistente à compressão e a resistência ao fogo. Algumas potencialidades deste betão também serão referidas. Finalmente, as conclusões mais vincadas também serão apresentadas.

Verificou-se que é possível fabricar um betão à base de resíduo de madeira com substituição total do agregado, que esse betão apresenta integridade material e que tem uma baixa densidade. Os resultados apresentados são correspondentes a uma fase preliminar.

## Materiais e composição

Tal como foi referido anteriormente, neste trabalho de investigação, pretendeu-se estudar o potencial de utilização de um material lenhoso como substituo do agregado de um betão corrente com os seguintes principais propósitos: a) fabricar um betão para uma situação de obra onde não seja requerida uma resistência à compressão elevada; b) fabricar um betão mais amigo do ambiente por usar um material natural e renovável.

Por exemplo, o agregado lenhoso poderá ser resultante de resíduos da floresta ou da indústria da madeira e, desta forma, o interesse ainda poderá ser acrescido pelo facto de se estar a utilizar também um resíduo.

Neste caso, foi estudada a aplicação de resíduos de madeira resultante de uma carpintaria, Figura 1.a, e que geralmente é utilizado como lenha para lareira.

Este tipo de resíduo poderá ser muito variado porque poderá conter pedaços de diferentes tipos de madeira maciça e de derivados de madeira. Este material também tende a apresentar diferentes dimensões e volumetrias.



a) Resíduo de carpintaria



b) Corte do resíduo

Figura 1: Material lenhoso de resíduo de carpintaria

Tal como se pode observar na Figura 1.a, este tipo de resíduo apresenta dimensões bastante superiores às dimensões correntes dos agregados do betão, como tal, foi necessário adequá-lo. Para o efeito, foi usada uma máquina de corte existente na carpintaria, Figura 1.b. Contudo, após este procedimento, os pedaços de madeira ainda apresentavam uma dimensão superior à de uma brita corrente, Figura 2.a. No sentido de corrigir este aspeto, usou-se uma britadeira e o agregado de resíduo de madeira passou a apresentar uma granulometria mais adequada e tal como mostra a Figura 2.b.

Para além deste agregado de resíduo de madeira (M) também se utilizou no fabrico do betão em estudo, o cimento Portland (C), uma areia de rio (A) e água (W). Nesta fase, considerou-se um traço de 1:1,5:1,5 (em volume) e uma relação W/C de 0.5. Nesta fase, também se substitui integralmente o agregado tradicional por agregado de resíduo madeira. Aquando da preparação das primeiras misturas verificou-se que era conveniente molhar previamente o agregado de resíduo de madeira, Figura 2.b. Após 4 dias de secagem nas condições de termohigrométricas de laboratório, os provetes foram descofrados, Figura 3.



a) Brita vs agregado de madeira



b) Agregado de madeira hidratado

Figura 2: Granulometria do agregado de madeira



a) Provete 1 (P1)



b) Provete 2 (P2)



c) Provete 3 (P3)

Figura 3: Provetes fabricados

### Algumas propriedades materiais

**Secagem e massa volúmica.** Durante o processo de secagem, em condições de laboratório, os provetes foram pesados aos 7, 14 e 28 dias de idade. O processo de secagem decorreu gradualmente e tal como mostra o gráfico da Figura 4.

Para os provetes fabricados, obteve-se um valor médio de massa volúmica igual  $1474 \text{ kg/m}^3$ .

De acordo com a NP EN 206 [9], o betão em estudo pode ser considerado um betão leve, em termos de massa volúmica.

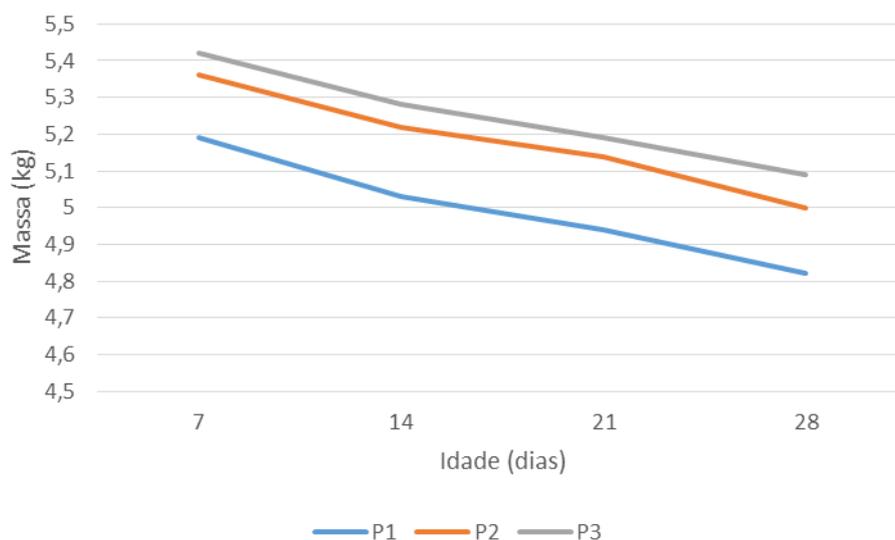


Figura 4: Secagem dos provetes ao longo do tempo

**Resistência à compressão.** À idade de 28 dias, os provetes foram ensaiados à compressão. Os dados e os resultados deste ensaio estão expostos na Tabela 1. Obteve-se um valor médio de resistência à compressão de 4 MPa. Este valor é baixo porque de acordo com [9], para um betão leve, a resistência à compressão deverá ser superior a 8 MPa. Este facto justifica estudar outros traços do betão à base de agregado de resíduo de madeira. Por sua vez, o modo de rotura à compressão dos provetes ensaiados correspondeu ao esperado e tal como mostra a Figura 5.

Tabela 1: Alguns dados e resultados do ensaio à compressão

Provetes	P1	P2	P3
Data da Amassadura	17/06/2022	17/06/2022	17/06/2022
Data do Ensaio	15/07/2022	15/07/2022	15/07/2022
Idade do Provede (dias)	28	28	28
Condições de Conservação	Temperatura ambiente	Temperatura ambiente	Temperatura ambiente
Dimensões do Provede (cm)	15×15×15	15×15×15	15×15×15
Modo de Rotura	Normal	Normal	Normal
Peso do Provede (kg)	4,823	5,032	5,093
Força de Rotura (kN)	77,7	98,6	94,3
Tensão de Rotura (MPa)	3,5	4,4	4,2



Figura 5: Modo de rotura à compressão

**Alguns aspetos tecnológicos.** Nesta fase preliminar deste estudo, também se pretendeu perceber a capacidade do betão à base de resíduos de madeira aderir a elementos metálicos e de madeira. Para o efeito, usou-se um perfil tubular circular de aço (Figura 6.a) e um elemento circular de madeira (Figura 6.b). Os dois elementos estruturais não sofreram qualquer tipo de tratamento. Após a betonagem e a secagem, observou-se que no caso do tubo metálico ocorreu uma boa aderência entre os dois materiais (Figura 6.a). Contrariamente, no caso do elemento de madeira não parece ter havido uma boa aderência entre materiais. De facto, surgiu uma junta entre o betão à base de resíduos de madeira e o elemento de madeira, Figura 6.b. Neste último caso, talvez molhando previamente o elemento de madeira ou assegurando alguma rugosidade superficial do elemento seja permita a aderência entre materiais. Com estes ensaios expeditos também se percebeu que é possível criar uma camada de recobrimento com o betão à base de resíduos de madeira.

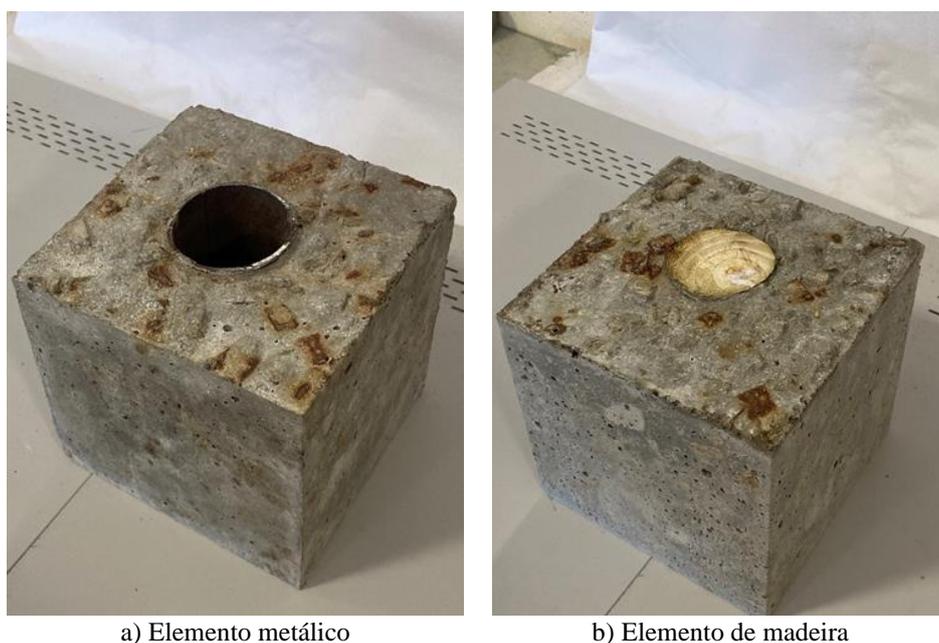


Figura 6: Potencial do betão em estudo como recobrimento de elementos metálicos e de madeira

Em paralelo, também se pretendeu perceber a capacidade resistente ao fogo do betão em estudo e a sua capacidade de proteção ao fogo de elementos estruturais. Para o efeito, procedeu-se à realização de um ensaio expedito ao fogo do provete de betão apresentado na Figura 6.a.

Este ensaio consistiu em colocar uma fonte de calor (maçarico) numa das faces do provete durante 10 minutos, Figura 7.a.

Após a realização deste ensaio, não se observou nenhum processo de combustão do betão à base de resíduos da madeira, não houve dano de material, não houve formação de fumo de combustão nem emissão de gases tóxicos. Face a estes resultados, é possível concluir que o betão em estudo parece resistir ao fogo apesar de conter granulado de resíduos de madeira.

Por sua vez, a camada de recobrimento de betão à base de resíduo de madeira também parece ter protegido o tubo de aço ao fogo atendendo à seguinte evolução da temperatura. Antes do início do ensaio, a temperatura do tubo de aço era de 26°C. Passados 3 minutos de ensaio, a temperatura manteve-se inalterada. A temperatura do tubo de aço só começou a subir muito lentamente após 6 minutos de ensaio. Ao fim de 10 minutos de ensaio (fim do ensaio), a temperatura do tubo de aço na sua face interior era de 42°C. Em contrapartida, nesta fase de ensaio, a face do provete exposta diretamente à chama do maçarico apresentava uma temperatura superficial de 153°C, Figura 7.b.



a) Decurso do ensaio

b) Após o ensaio

Figura 7: Ensaio expedito ao fogo

Face ao exposto, também parece ser possível afirmar que a camada de recobrimento de betão à base de resíduo de madeira protege o elemento de aço em relação ao fogo. Semelhante conclusão poderá ser extrapolada para o elemento de madeira embora, neste caso, ainda seja necessário realizar ensaios para confirmar esta possibilidade. A camada de recobrimento de betão à base de resíduo de madeira também poderá, eventualmente, proteger o elemento de aço em relação à oxidação, embora também seja necessário realizar ensaios para avaliar esta possibilidade futuramente.

Mais se informa, que alguns provetes do betão em estudo foram colocadas num recipiente com água durante uma semana. Após este tempo, estes provetes foram retirados e não se observou nenhuma desintegração do material.

## Conclusão

Nesta fase preliminar deste trabalho de investigação e face ao exposto durante este documento, várias conclusões podem ser alcançadas e de acordo com o que se indica seguidamente.

- Parece importante otimizar o processo de corte do resíduo de madeira de modo a encontrar uma solução mais expedita.
- Foi possível fabricar um betão à base de resíduo de madeira.
- A massa volúmica do betão estudado insere-se nos valores de um betão leve.
- A capacidade resistente à compressão do betão em estudo é muito reduzida. Esta limitação necessita contornada através de reformulação do traço do betão.
- O betão estudado parece ter capacidade de adesão a elementos metálicos.
- Este betão também parece resistir ao fogo.
- Este betão também permitir fazer camada de recobrimento e proteger em relação ao fogo elementos metálicos.
- Em termos de trabalhos futuros é necessário estudar novas composições, fazer maior quantidade de provetes, estudar o envelhecimento deste betão leve, estudar outro tipo de aplicação deste betão leve, entre outros.

## Agradecimentos

Este trabalho de investigação foi parcialmente financiado pelo Projeto MICADO - Modular Insulated Concrete core - ADvanced and OptimizeD panelized production system, operação n.º NORTE-01-0247-FEDER-113482, BI/UTAD/54/2022.

## Referências

- [1] Pacheco-Torgal, F.; Castro-Gomes, J.P.; Jalali, S. *Utilization of mining wastes to produce geopolymer binders*. Geopolymers Struct. Process. Prop. Ind. Appl. (2009) 267–293.
- [2] Cristelo, N.; Vieira, C.S.; de Lurdes Lopes, M. *Geotechnical and Geoenvironmental Assessment of Recycled Construction and Demolition Waste for Road Embankments*. Procedia Eng., 143, (2016) 51–58.
- [3] Helepciuc, M. C., Bartuta, M., Serbanoiu, A. A., 2017. *Characterization of a lightweight concrete with sunflower aggregates*. In 11th International Conference Interdisciplinarity in Engineering.
- [4] Sada, B.H., Amarteyb, Y.D., Bakoc, S., *An Investigation into the use of groundnut shell as fine aggregate replacement*. Niger J. Technol. (2013) 32 (1).
- [5] Modani, P.O., Vyawahare, M.R., *Utilization of bagasse ash as a partial replacement of fine aggregate in concrete*. Proc. Eng. (2013) 51.
- [6] Prusty, K. J., Patro, K. S., Basarkar, S. S., 2016. *Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment – A review*.
- [7] Panesar, D.K., Shindman, B., *The mechanical, transport and thermal properties of mortar and concrete containing waste cork*. Cem.Concr. Comp. (2012) 34.
- [8] Jorge Pinto, Daniel Cruz, Anabela Paiva, Sandra Pereira, Pedro Tavares, Lisete Fernandes, Humberto Varum (2012). *Characterization of corn cob as a possible raw building material*. Construction and Building Materials 34 (2012) 28-33 (doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.014).
- [9] NP EN 206-1. 2007. Betão. Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade.

## **Incorporação de resíduos agroflorestais em argamassas de cal: resultados preliminares**

JERÓNIMO Alexandre<sup>1,a</sup>, GONÇALVES Danyele<sup>2,b</sup>, SILVA Isabelle<sup>2,c</sup>,  
FERNANDES Mariana<sup>1,3,d</sup> e BRIGA-SÁ Ana<sup>1,2,e</sup>

<sup>1</sup>CQ-VR, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 5000-801 Vila Real, Portugal.

<sup>2</sup>Departamento de Engenharias, Escola de Ciências e Tecnologia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 5000-801 Vila Real, Portugal.

<sup>3</sup>Departamento de Química, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, 5000-801 Vila Real, Portugal.

<sup>a</sup>ajaj@utad.pt, <sup>b</sup>danyelemaciel18@gmail.com, <sup>c</sup>isabellecristina44@gmail.com, <sup>d</sup>mcpf@utad.pt, <sup>e</sup>anas@utad.pt

**Palavras-chave:** Resíduos Agroflorestais, Casca de Amêndoa, Caroco de Azeitona, Argamassas, Sustentabilidade, Economia Circular.

**Resumo** A problemática das alterações climáticas, da escassez de recursos e da elevada produção de resíduos com que a sociedade se depara exige a adoção de comportamentos mais sustentáveis, com especial ênfase nos setores económicos com maior contribuição para o panorama atual, como é o caso do setor da construção. Mostra-se, portanto, fundamental a adoção de soluções construtivas mais sustentáveis que contribuam para a redução do consumo de recursos e que potenciem a reciclagem e reutilização de resíduos. Atenção acrescida tem sido dada à valorização de resíduos e subprodutos provenientes das diversas atividades económicas e à sua utilização como matéria-prima na obtenção de novos materiais numa perspetiva de economia circular e de criação de valor. Diversos investigadores têm proposto a utilização de bio resíduos em materiais de construção, como agregados ou ligantes, solucionando, por um lado, os possíveis problemas inerentes à eliminação de bio resíduos, dada a valorização que lhes é atribuída e, por outro lado, a diminuição na utilização de matérias-primas. É neste contexto que este trabalho de investigação é proposto. Pretende-se com este estudo avaliar a possibilidade de incorporação de resíduos agroflorestais na obtenção de argamassas mais sustentáveis. Serão analisadas diferentes formulações de argamassas à base de cal com adição de resíduos de resíduo de casca de amêndoa e de cinza de caroco de azeitona e realizados ensaios de caracterização mecânica e de absorção de água. Será também efetuada uma análise comparativa entre as diferentes composições de argamassas em estudo, bem como a verificação da sua adequação aos requisitos regulamentares.

### **Introdução**

A problemática das alterações climáticas, da escassez de recursos e da elevada produção de resíduos com que a sociedade atual se depara exige a adoção de comportamentos mais sustentáveis que visem a mitigação dos efeitos nefastos no meio ambiente. O setor da construção assume um papel preponderante neste âmbito, dada a sua contribuição no elevado consumo de matérias-primas e na produção de resíduos, traduzindo-se consequentemente num aumento das emissões de CO<sub>2</sub>. As emissões de CO<sub>2</sub> aumentaram para 9,95Gt em 2019, sendo a construção civil responsável por 38% destas emissões [1]. Neste contexto, mostra-se fundamental optar por práticas mais sustentáveis e que integrem os princípios de circularidade. Uma das formas consiste em incentivar a redução, reutilização, recuperação e reciclagem de resíduos e subprodutos. Resíduos que até então eram depositados na natureza ou incinerados por se

considerar o fim da sua vida útil, são utilizados como matéria-prima no mesmo setor ou em outros setores de atividade económica, estimulando a circulação dos materiais em ciclo fechado [2].

Diversos são os resíduos e subprodutos resultantes das várias atividades económicas com potencial de reutilização, destacando-se neste trabalho de investigação os decorrentes da atividade agroflorestal [3], cujo aumento de produção se tem vindo a verificar, decorrente do crescimento populacional e da agricultura intensiva [4].

Neste contexto, a incorporação de resíduos em materiais de construção tem despertado a atenção por parte da comunidade científica, tendo surgido diversos estudos que abordam a sua introdução como ligante ou como agregado, decorrentes ou não de processos de transformação. Uma elevada ênfase tem sido dada ao reaproveitamento de cinzas com o objetivo de aumentar a resistência mecânica dos materiais. Cinzas resultantes do bagaço da cana-de-açúcar [5], da folha de bananeira [6] e do carolo de espiga de milho [7] são alguns dos exemplos. Resíduos e subprodutos agrícolas e florestais sem transformação, tais como bambu e casca de amendoim [8], fibra de coco [9], casca de café [10], casca de amendoim [11] e carolo de espiga de milho triturado [12], têm também sido alvo de estudo. A elevada variabilidade de resíduos resultantes deste tipo de atividades, justifica a continuidade dos trabalhos de investigação, destacando-se neste estudo os resíduos de casca de amêndoa e de caroço de azeitona, dada a importância que a produção de amêndoa e de azeite assume a nível económico. A amendoeira (*Prunus dulcis*) é uma espécie originária das regiões quentes e áridas do sudeste da Ásia [13] e encontra-se, atualmente, dispersa por quase todo o mundo, sendo que 36% da área ocupada pela amendoeira se localiza na Europa [14]. A produção mundial de amêndoa com casca foi de 4,1 milhões de toneladas em 2020, destacando-se os Estados Unidos como maiores produtores, com cerca de 57% da produção [15].

No contexto europeu, a Espanha apresenta-se como o maior produtor e, em Portugal, salienta-se o acréscimo de produção verificado nos últimos anos, a que não será alheia a plantação de grandes manchas de amendoeiras regadas na zona de influência do Alqueva [16]. A produção de amêndoa em Portugal assume um papel de elevada importância a nível económico, ambiental, cultural e social, sendo elemento caracterizador da paisagem e uma das principais fontes de rendimento em algumas regiões, como é o caso da região de Trás-os-Montes e Alto Douro, que constitui uma das zonas de produção mais importante do País. Associada à elevada produção deste fruto de casca rija, está o aumento da produção de resíduos e subprodutos, cujas alternativas de valorização deverão ser potenciadas.

Os principais resíduos associados à produção de amêndoa são os que resultam do processo de limpeza das amendoeiras e da descasca do fruto. Se se considerar a produção mundial de amêndoa referente ao ano de 2020, cerca de 1 milhão de toneladas de resíduos é referente à casca rija da amêndoa [16].

O cultivo de oliveiras (*Olea europaea L.*) desempenha um papel semelhante no panorama económico, sendo característico das regiões do sul da Europa e Norte de África. A maior percentagem de produção de azeitona é destinada à obtenção de azeite, sendo apenas 7% a 10% da produção mundial consumida como azeitona de mesa [17]. A nível mundial, em 2013, cerca de 2,67 milhões de toneladas de azeitonas teve como destino a produção do azeite. A produção mundial concentra-se nos países com tradição no consumo de azeite. A Espanha é líder mundial com uma produção de cerca de 4,5 milhões de toneladas, seguindo-se a Grécia com aproximadamente 2,5 milhões de toneladas [18]. Em Portugal, a colheita de azeitona atingiu 1,35 milhões de toneladas no ano de 2021 [19], sendo mais de 79% da produção assegurada pela região do Alentejo. Das diferentes etapas associadas ao processo de produção de azeite, resultam diversos resíduos, tais como bagaço de azeitona, os caroços, as folhas e as águas ruças, que constituem um problema ambiental complexo, pois apresentam uma contribuição poluente entre 200 a 400 vezes mais elevada do que as águas residuais domésticas [20]. Considerando os valores médios apresentados por Romero-Garcia, estima-se que a colheita referente ao ano de 2021 em Portugal tenha originado 270 000 toneladas de caroços de azeitona e 1 080 000 toneladas de bagaço húmido. Atualmente, o caroço da azeitona é usado como biomassa e da combustão desta biomassa resulta a cinza [18].

Da indústria relativa à produção de azeitona de mesa resulta também uma fonte substancial de caroços de azeitona. No caso dos caroços de azeitona decorrentes da produção do azeite, estes são esmagados e transformados em pequenas partículas através do processo de centrifugação [21].

Neste contexto, pretende-se com este trabalho contribuir para o estudo e desenvolvimento de soluções de valorização de resíduos e sua incorporação no sector da construção. Assim sendo, o trabalho desenvolvido tem como principal objetivo avaliar a possibilidade de incorporação de resíduos de casca de amêndoa e de cinza de caroço de azeitona em argamassas à base de cal hidráulica natural para aplicação no interior dos edifícios. Os dois resíduos em estudo foram incorporados na composição das misturas com percentagens de 2%, 4% e 8%, em substituição parcial da areia. Foram realizados diversos ensaios, destacando-se nesta fase os relativos ao comportamento mecânico (flexão e compressão) e absorção de água por capilaridade.

## Materiais e métodos

### Caracterização dos resíduos.

**Resíduo de Casca de Amêndoa (RCA).** O resíduo de casca de amêndoa (RCA) em estudo, Figura 1b), foi fornecido por produtores da região de Trás-os-Montes e Alto Douro. Numa primeira fase, procedeu-se à sua caracterização química elementar e à determinação da densidade.

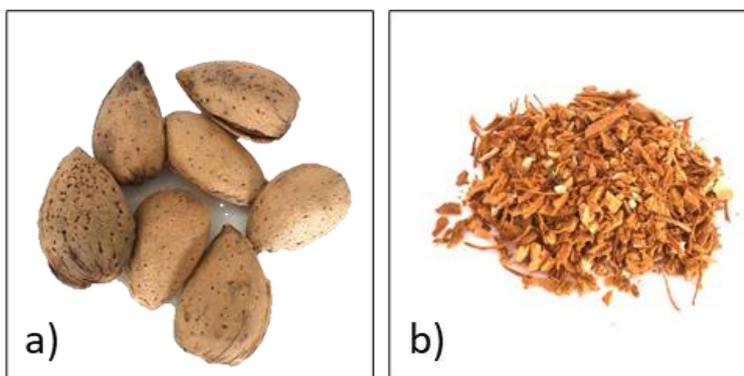


Figura 1: a) Amêndoa, b) Resíduo de casca de amêndoa (RCA)

A análise química elementar realizada ao RCA revela que este é maioritariamente composto por carbono (55%) e oxigênio (43%).

A granulometria do RCA é inferior a 4 mm, com uma densidade de 1058,99 kg/m<sup>3</sup>.

**Cinza do Caroço de Azeitona (CCA).** A cinza do caroço da azeitona (CCA) utilizada neste trabalho de investigação foi fornecida pela Cooperativa Agrícola Sabodouro, localizada em Mogadouro. O caroço de azeitona é utilizado como biomassa no aquecimento da água durante o processo de extração. Dessa queima resulta a cinza que atualmente é usada como fertilizante agrícola. Na Figura 2, é possível observar o caroço de azeitona antes e depois da moagem, bem como a cinza resultante da queima. A CCA utilizada apresenta dimensões inferiores a 2mm e um valor de densidade igual a 1274,80 Kg/m<sup>3</sup>. A análise química elementar revela que os elementos que mais se destacam são o oxigênio (29%) e o cálcio (30%).

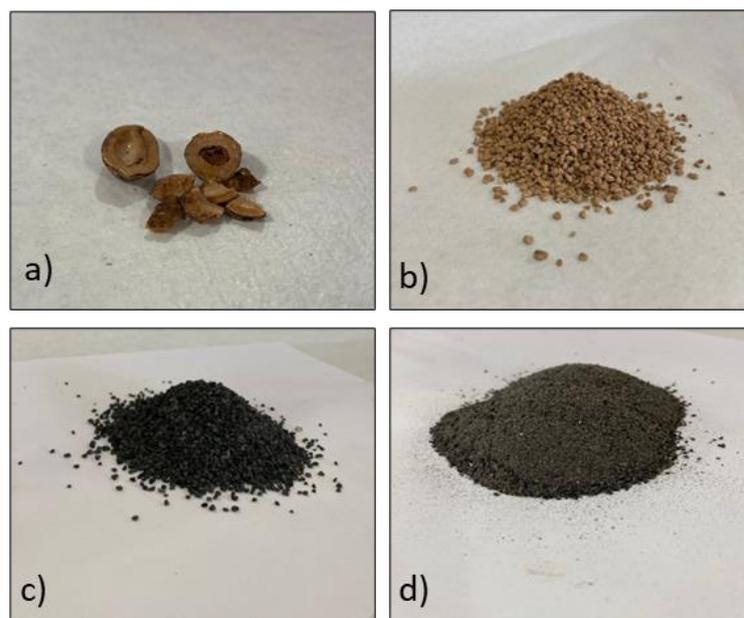


Figura 2: Transformação do caroço de azeitona durante o processo de produção de azeite: a) caroço de azeitona, b) após moagem, c) durante a queima, d) após a queima (CCA)

**Preparação das amostras.** Para a preparação das misturas de argamassa de cal utilizou-se: cal hidráulica natural (NHL5) com densidade de 2700 Kg/m<sup>3</sup>; água destilada; areia natural de rio, com densidade de 2322 Kg/m<sup>3</sup>; superplastificante (SP) Master SKY617 com densidade igual a 1041 Kg/m<sup>3</sup>, com elevada classe de trabalhabilidade e baixa relação A/C; RCA com densidade de 1058,99 kg/m<sup>3</sup>; e CCA com densidade de 1274,80 Kg/m<sup>3</sup>.

Para analisar a influência da adição de cada um dos resíduos no comportamento das argamassas de cal, foram definidas três composições de mistura, sendo o resíduo adicionado como substituto parcial da areia nas proporções de 2%, 4%, 8%, Figura 3. Foi também utilizada uma mistura de referência correspondente a uma argamassa sem incorporação de resíduo.

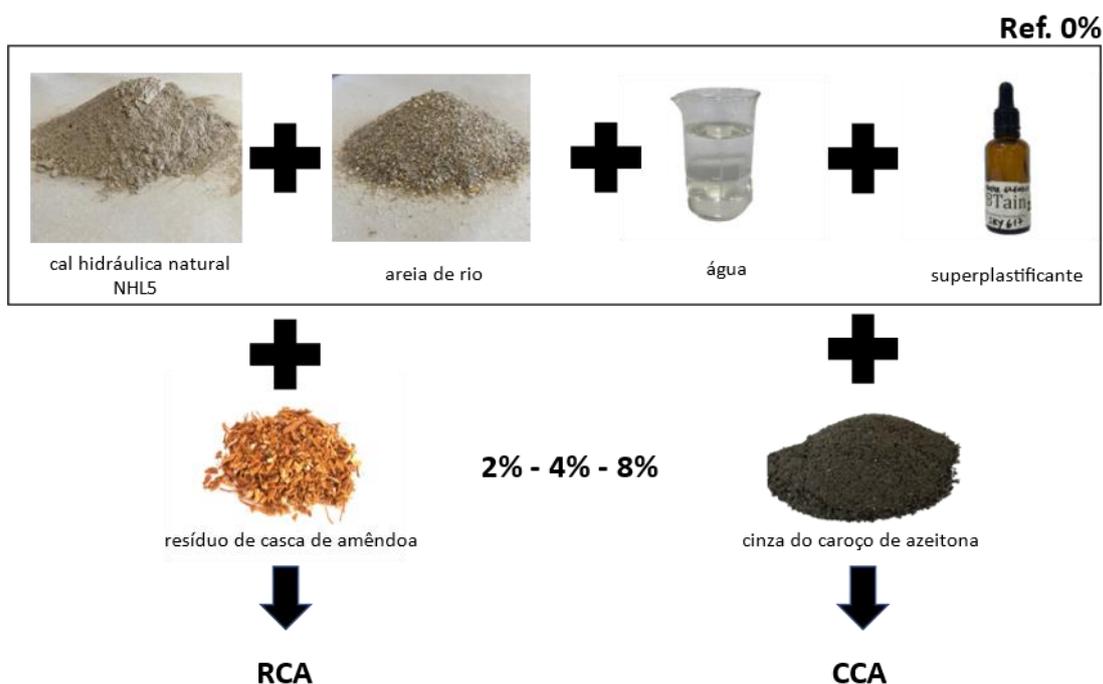


Figura 3: Representação esquemática da preparação das amostras de argamassa

Na Tabela 1, apresentam-se as formulações para cada tipo de amostra. Para a execução das amostras, foi utilizado o molde prismático de 40 mm x 40 mm x 160 mm, em conformidade com a norma EN 1015-11:1999 [22], Figura 4.

Para cada mistura foram preparados três provetes para posterior realização dos ensaios de flexão e de compressão. Para os ensaios de absorção de água por capilaridade foram também preparados três provetes de cada uma das misturas [23].

Tabela 1: Formulação das argamassas de cal [kg/m<sup>3</sup>]

Amostra	Composição	Ligante	Areia	SP	Água	RCA	CCA
Ref. 0%	referência	500,00	1319,24	1,50	360,00	0,00	0,00
RCA 2%	2% amêndoa	500,00	1185,00	3,00	360,00	10,00	0,00
RCA 4%	4% amêndoa	500,00	1154,00	4,00	360,00	20,00	0,00
RCA 8%	8% amêndoa	500,00	1112,00	5,00	360,00	40,00	0,00
CCA 2%	2% cinza	500,00	1204,35	1,50	359,48	0,00	10,00
CCA 4%	4% cinza	500,00	1181,87	2,00	359,48	0,00	20,00
CCA 8%	8% cinza	500,00	1138,20	2,50	359,48	0,00	30,00

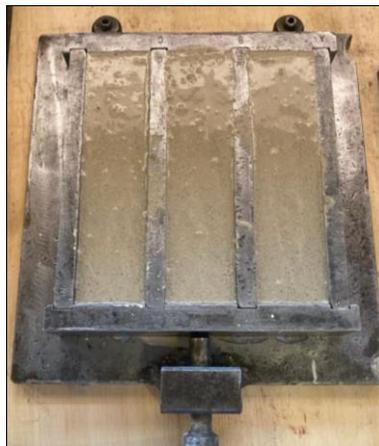


Figura 4: Colocação da mistura de argamassa no molde prismático

Na Figura 5, é possível observar o aspeto de cada uma das amostras analisadas, cuja cura foi efetuada no laboratório à temperatura ambiente durante 28 dias.

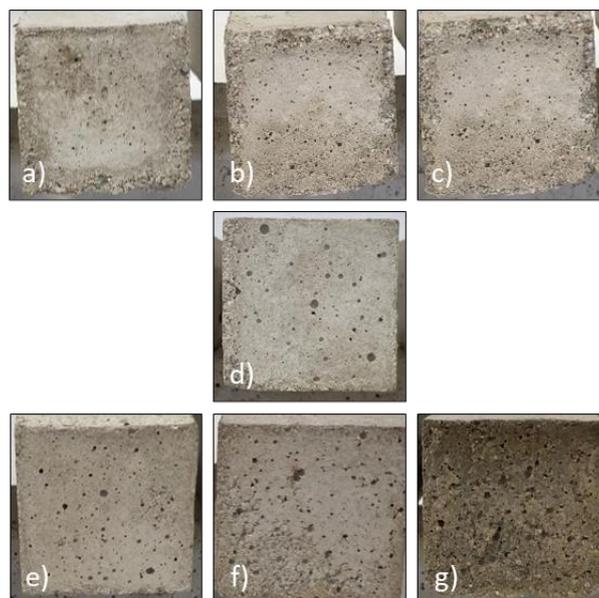


Figura 5: Amostras. a) RCA 2%, b) RCA 4%, c) RCA 8%, d) Ref. 0%, e) CCA 2%, f) CCA 4% e g) CCA 8%

**Procedimento experimental.** Nesta secção, é descrito o procedimento experimental associado ao registo de variação de massa, bem como à realização dos ensaios de flexão, compressão e absorção de água por capilaridade.

**Registo da variação da massa.** Aquando da desmoldagem dos provetes, realizada ao 2º dia de

cura, procedeu-se à sua pesagem, repetindo-se o processo aos 7, 14, 21 e 28 dias, com o objetivo de avaliar o tempo de secagem do material e, conseqüentemente, a perda de massa verificada para as diferentes misturas. Foi usada para o efeito uma balança de laboratório de 2000g de capacidade e com precisão de 0,01g.

**Flexão e compressão.** Os ensaios de flexão e compressão foram realizados aos 28 dias, em concordância com a norma EN 1015-11: 2019 [24]. A carga foi aplicada à velocidade de 1mm/min. Obtidos os valores da carga aplicada em (KN) e do deslocamento em (mm), foi calculada a resistência à flexão através da Eq. (1):

$$f = 1,5 \frac{F \cdot l}{(b \cdot d)^2} \quad (1)$$

Sendo:

f = Resistência à flexão [MPa];

F = Carga máxima aplicada [N];

l = Distância entre os eixos de apoio da amostra [mm];

b = Largura da amostra [mm];

d = Espessura da amostra [mm].

Para o ensaio de compressão, usaram-se as metades das amostras resultantes do ensaio de resistência à flexão, Figura 6b). A carga foi aplicada até atingir a rotura, tendo-se posteriormente calculado a resistência à compressão através da Eq. (2):

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

Sendo:

R<sub>c</sub> = Resistência à Compressão [MPa];

F = Carga máxima aplicada [N];

A<sub>c</sub> = Área de carga [mm<sup>2</sup>].

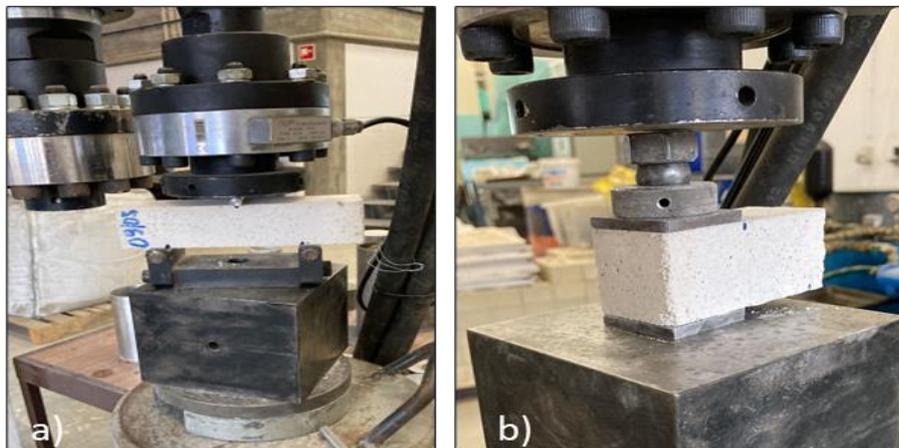


Figura 6: Realização dos ensaios mecânicos: a) flexão e b) compressão

**Absorção de água por capilaridade.** O ensaio de absorção de água foi realizado tendo por base a norma EN 1015-18:2002 [25] (as faces das amostras não foram parafinadas) e a EN ISO 1514:2016 [26].

Numa primeira fase, e com o objetivo de eliminar a humidade, as amostras foram colocadas na estufa a 60°C durante 24 horas, sendo, de seguida, colocadas no exsiccador, durante 24 horas. Após este processo, efetuou-se uma marcação no provete afastada 5 mm de uma das menores arestas da amostra, sendo esta marcação a linha a referência para o nível máximo da lâmina de água e para a realização das medições. O coeficiente de absorção de água foi obtido pela Eq. (3):

$$C = 0,1 \times (m_2 - m_1) \quad (3)$$

Sendo:

C = Coeficiente de absorção

$m_1$  = Massa aos 10 minutos (Kg)

$m_2$  = Massa aos 90 minutos (Kg)

## Resultados e discussão

**Registo da variação da massa.** Na Figura 7, é possível observar a variação da massa registada para cada uma das amostras, cuja curva de tendência é semelhante. Os resultados obtidos permitem também concluir que a variação de massa ocorre de forma mais significativa nos primeiros 7 dias e que tende a estabilizar em todas as amostras a partir dos 21 dias. Ao fim dos 28 dias, observa-se que a amostra com maior massa corresponde à Ref. 0%, com 471,88 g, enquanto a de menor massa é a amostra CCA 8%, com 428,38 g. Em termos globais, verificou-se uma redução de cerca de 8% em relação à massa inicial para todas as amostras. Comparando os valores obtidos aos 28 dias, verifica-se que todas as amostras com incorporação de resíduos apresentam valores de massa inferiores à amostra Ref. 0%. Decréscimos de 3,2 %, 2,7%, 4,7%, 0,9 %, 7,7% e 5,1 % são obtidos para as amostras CCA 2%, RCA 2%, CCA 4%, RCA 4%, CCA 8% e RCA 8%, respetivamente.

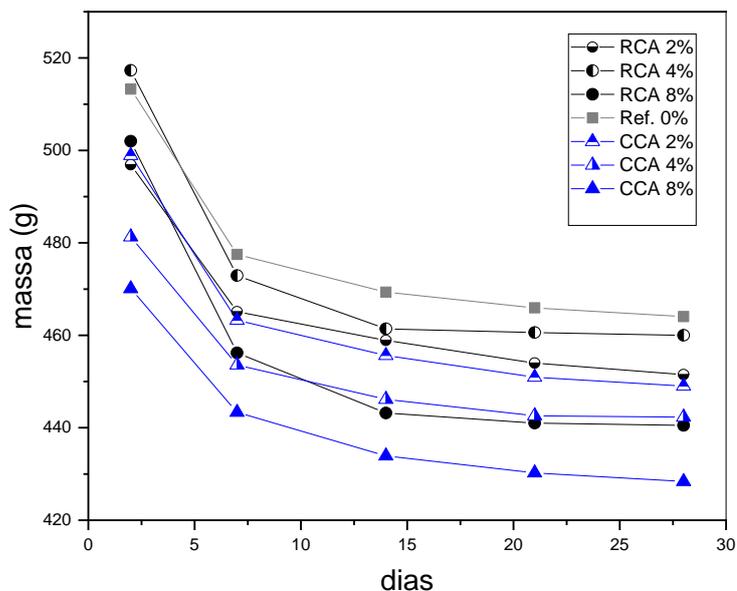


Figura 7: Variação da massa das amostras ao longo do processo de cura

**Resistência à flexão e compressão.** Na Figura 8, indicam-se os resultados referentes à resistência à flexão e à compressão para as diferentes amostras. Observa-se que a amostra RCA 2% apresenta um valor de resistência à compressão 67,5% superior ao verificado para RCA 4% e 92,9% relativamente a RCA 8%. Verifica-se que, com o aumento de adição de RCA, a resistência à compressão diminui. Efetuando uma comparação com a amostra Ref. 0%, verifica-se que todas as amostras apresentam uma resistência inferior. No que respeita à flexão, a amostra RCA 4% apresentou um aumento de resistência de 80% em relação a RCA 2%, no entanto esta volta a decrescer para RCA 8%, esta variação sugere-nos que em relação à flexão o valor máximo de incorporação do resíduo estará próximo dos 2%

Relativamente às argamassas com incorporação de cinza do caroço de azeitona, a amostra com melhor desempenho foi a CCA 2%, com valor de resistência à flexão de 1,10 Mpa, 46,7 %, superior a Ref. 0%. No que respeita à resistência à compressão, a amostra CCA 2% revela um valor 4,7% superior ao da amostra Ref. 0%. Uma análise global permite concluir que o aumento da percentagem de CCA conduz a uma diminuição da resistência à compressão.

De acordo com a norma EN 998-1:2010 [27], as amostras RCA 2%, RCA 4%, Ref. 0%, CCA 2%, CCA 4% e CCA 8% podem ser classificadas como argamassas CS II e a amostra RCA 8% como CS I.

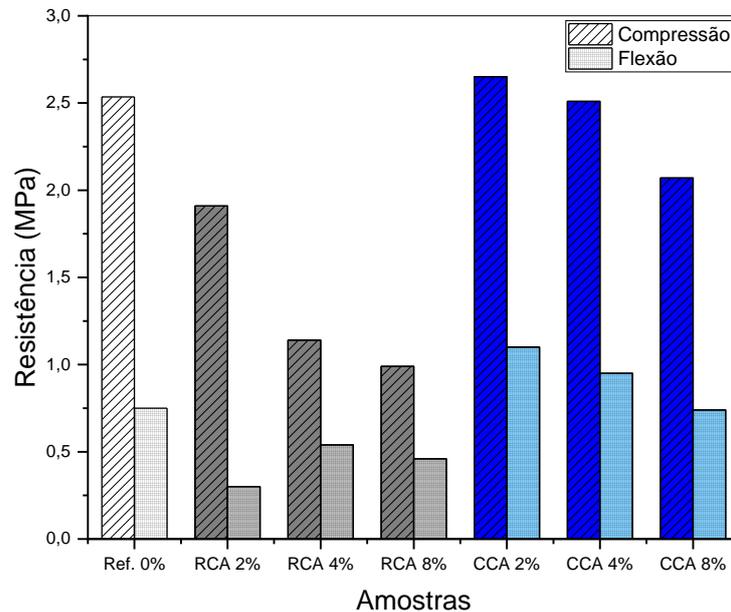


Figura 8: Resultados da resistência à flexão e compressão

**Absorção de água por capilaridade.** Na Figura 9, é observável um aumento da absorção de água em todas as amostras até às 8 horas, mantendo-se depois praticamente estável. As amostras CCA mantêm um comportamento semelhante à Ref. 0%, enquanto as amostras RCA absorvem menos água por capilaridade em relação às amostras CCA e Ref. 0%.

As amostras Ref. 0% e CCA 2% apresentam o coeficiente de capilaridade mais elevado, ambas com  $2,15 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ , enquanto a amostra RCA 8% obteve o coeficiente de capilaridade mais baixo com  $1,18 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$  (Figura 10).

De acordo com a norma EN 998-1:2010, [27], pode concluir-se que as argamassas não cumprem os requisitos para aplicação em revestimentos exteriores, pois o coeficiente de absorção deve ser igual ou inferior a  $0,4 \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$ . Sugere-se, no entanto, a possibilidade de aplicação em revestimentos interiores, em locais não húmidos.

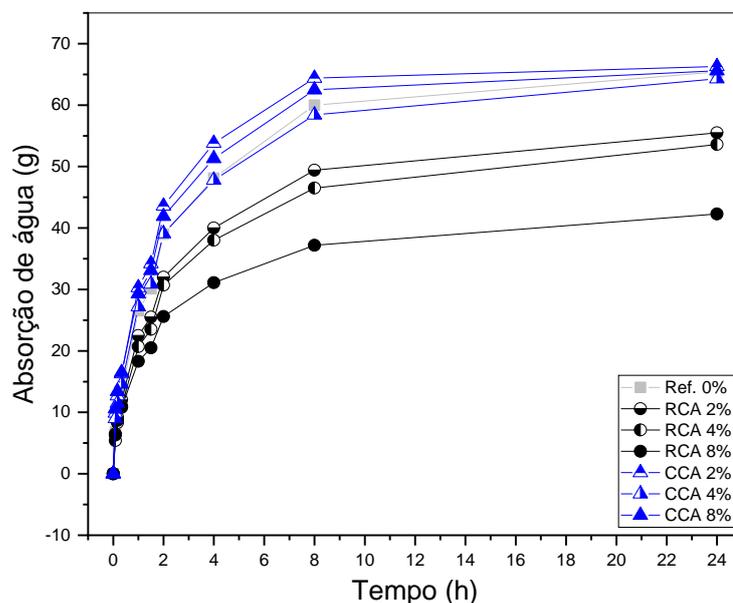


Figura 9: Variação da absorção de água em 24h

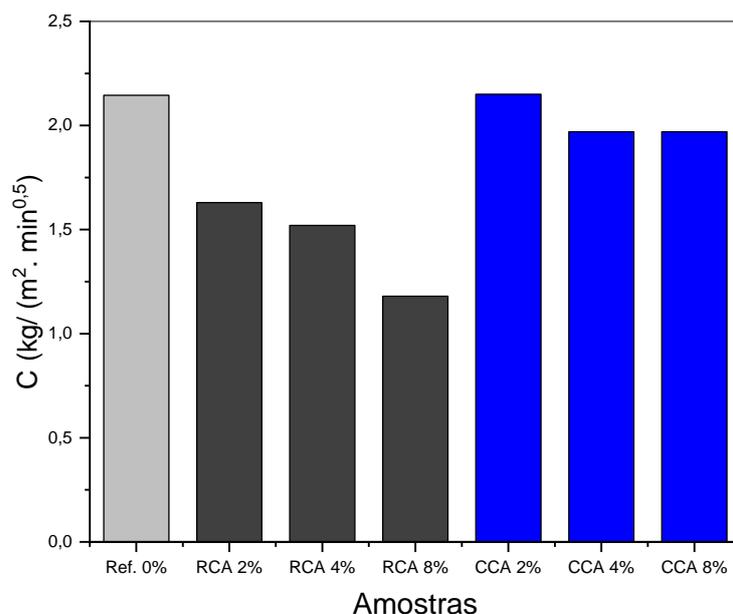


Figura 10: Coeficiente de Capilaridade, C

## Conclusões

A incorporação de resíduos como matéria-prima na obtenção de materiais de construção apresenta-se como uma solução sustentável para minimizar o consumo de recursos e potenciar o reaproveitamento de resíduos numa perspetiva de economia circular e de criação de valor. A valorização de resíduos decorrentes da atividade agrícola, neste caso, os que resultam da produção de amêndoa e da produção e azeite, poderá ser um contributo neste sentido, para além de constituir uma solução alternativa nos períodos com excedência de produção.

O resíduo de casca de amêndoa e a cinza do caroço de azeitona foram introduzidos em diferentes percentagens em argamassas de cal, tendo sido determinados a variação da massa, a resistência mecânica à flexão e à compressão e o coeficiente de absorção de água por capilaridade. Os resultados foram comparados com os obtidos para uma argamassa de referência, sem qualquer adição de resíduo.

Os resultados obtidos permitem concluir que é viável a incorporação dos referidos resíduos nas argamassas à base de cal hidráulica natural. Observou-se que aos 28 dias todas as argamassas com incorporação de resíduos são mais leves que a argamassa de referência sem incorporação de resíduos.

Conclui-se ainda que as argamassas com incorporação de cinza de caroço de azeitona apresentaram um melhor desempenho mecânico do que as argamassas com incorporação de resíduo de casca de amêndoa. Os resultados sugerem também que as argamassas com incorporação de resíduo de casca de amêndoa apresentam uma significativa redução do coeficiente de capilaridade.

Sendo estes estudos preliminares, considera-se necessária a realização de estudos mais aprofundados com o objetivo de otimizar a quantidade de resíduos a incorporar nas argamassas e simultaneamente melhorar o seu desempenho. Estão neste momento em curso diversos ensaios, tais como análise de porosimetria, crescimento acelerado de microrganismos e ensaios de durabilidade, para melhor caracterizar e potenciar este tipo de argamassas.

## Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito dos projetos UIDB/00616/2020 e UIDP/00616/2020 para a Unidade Instituto CQ-VR e pelo Projeto OBTAIN, Objective Building Sustainability (NORTE-010145-FEDER-000084). M. Fernandes reconhece a FCT-UTAD pelo contrato no âmbito do Decreto-Lei n.º 57/2016 – Lei n.º 57/2017.

## Financiamento

Este trabalho foi financiado pelo Projeto I&D OBTAIN- Objective Building Sustainability operação nº. NORTE-01-0145-FEDER-000084, cofinanciado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER) através do NORTE 2020 (Programa Operacional Regional Norte 2014/2020).

## Referências

- [1] R. Zandonai, *UNEP*, United Nations - Environment Programme, <https://www.unep.org/pt-br/noticias-e-reportagens/comunicado-de-imprensa/emissoes-do-setor-de-construção-civil-atingiram>, 20/09/ 2022.
- [2] V. B. W. Brito, *Incorporação do resíduo da queima do folheto de uva em elementos de construção*, Dissertação de Mestrado, UTAD, Vila Real, (2021).
- [3] United Nations, *Glossary of Environment Statistics, Studies in Methods*. United Nations, 67, (1997).
- [4] B. Koul, M. Yakoob e M. P. Shah, *Agricultural waste management strategies for environmental sustainability*, *Environmental Research*, (2022) 206, <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112285>.
- [5] S. T. M. Oliveira, A. C. Miranda, S. C. da Silva Filho e R. B. Klepa, *Cinza a partir do bagaço da cana-de-açúcar reutilizada como parte integrante em argamassas e concretos na indústria civil*, XXXVII ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, Joinville, SC, Brasil, (2017).
- [6] D. M. P. Mota, S. J. S. Diniz, A. C. M. Reis, D. S. Alcântara, E. H. G. Costa, G. S. Campos, L. O. Abreu e N. Carvalho, *Adição da cinza da folha de babaneira na argamassa*, *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, 9, (2020) 55-69, doi:<http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v9e0202055-69>.
- [7] R. Fiegenbaum, *Avaliação do potencial pozolânico da cinza de sabugo de milho*, Universidade do Vale do Taquari Univates, Lajeado, (2020).
- [8] S. M. Nasser, *Painéis de partículas de bambu e casca de amendoim com adesivo à base de mamona*, Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP, (2016).
- [9] C. M. Nascimento, *Estudo da fibra de coco como reforço em tijolo de solocimento*, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, (2011).
- [10] A. S. A. Santos, *Utilização de casca de café na construção civil: desempenho térmico em edificações com enfoque na sustentabilidade e reaproveitamento de resíduo agrícola*, Universidade do Vale do Taquari - UNIVATES, Lajeado, (2020).
- [11] W. A. Junior, *Análise do gradiente de temperatura e das propriedades físicas de uma parede com argamassa de revestimento com a incorporação de Cinzas de Casca de Amendoim*, IX ENSUS – Encontro de Sustentabilidade em Projeto – UFSC, Florianópolis, (2021).
- [12] F. S. da Rosa, G. Grigoletti e R. de Lima, *Isolante térmico à base de sabugo de milho*, em *Mix Sustentável*, Florianópolis, (2019).
- [13] G. Ladizinsky, *On the origin of almond*, *Genetic Resources and Crop Evolution*, 46, (1999) 143-147.

- [14] M. A. Rodrigues, *Amendoeira estado da produção*, Editor CNCFS, (2017).
- [15] FAOSTAT, *Crops and livestock products*, <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>, em 25/09/2022.
- [16] Agrotec, <http://www.agrotec.pt/noticias/a-cultura-da-amendoeira-em-portugal-e-no-mundo/> , em 25/09/2022.
- [17] R. W. Hutkins, *Microbiology and Technology of Fermented Foods*, Blackwell Publishing, Australia, (2006).
- [18] J. Alves, E. Sivinski, M. De Oliveira e F. Santos, *Biomassa de oliveira: cenário atual e perspectivas*, em *Agricultura em foco: Tópicos em manejo, fertilidade do solo e impactos ambientais - Volume I.*, editora científica digital, (2020) 65-79, doi: 10.37885/200600514.
- [19] INE, instituto nacional de estatística, [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_indicadores&indOcorrCod=0008302&contexto=bd&selTab=tab2](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_indicadores&indOcorrCod=0008302&contexto=bd&selTab=tab2) , em 25/09/2022.
- [20] Noctula, <http://noctula.pt/residuos-dos-lagares-de-azeite/> , em 28/09/2022.
- [21] J. M. Romero-García, L. Niño, C. Martínez-Patiño, C. Álvarez, E. Castro e M. J. Negro, *Biorefinery based on olive biomass. State of the art and future trends*, *Bioresource Technology*, 159, (2014) 421-432.
- [22] CEN, EN 10152-11, *Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*, European committee for standardization-CEN, Bruxelas, (1999).
- [23] ISO, ISO15148, *Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of water absorption coefficient by partial immersion*, International Organization for Standardization-ISO, Vernier, Geneva, (2002).
- [24] CEN, EN 1015-11, *Methods of test for masonry – part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar*, European committee for standardization-CEN, Bruxelas, (2019).
- [25] CEN, EN 1015-18:2002, *Methods of test for mortar for masonry – part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar*, European committee for standardization-CEN, Bruxelas, (2002).
- [26] ISO, *Paints and varnishes — Standard panels for testing*, International Organization for Standardization-ISO, Vernier, Geneva, (2016).
- [27] CEN, EN 998-1:2010, *Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar*, European committee for standardization-CEN, Bruxelas, (2010).
- [28] U. Nations, *Development and international economic co-operation: Environment*, United Nations - General Assembly, Oslo, (1987).
- [29] P. D. M. Silva, *Estudo de argamassas com incorporação de resíduos de casca de ovo*, (Dissertação de Mestrado) Universidade de Coimbra, Coimbra, (2017).
- [30] B. L. Rodrigues e A. Neves Junior, *Análise térmica de pastas a base de cal hidratada com utilização de cinza do bagaço de cana-de-açúcar*, *ES Engineering and Science*, 7 (2018), 39-48, <https://doi.org/10.18607/ES201877116>.

## Cimento ecossustentável sem clínquer obtido pela mistura de resíduos

DEMARCO Marcel<sup>1,a</sup>, ZAGO Sara<sup>2,b</sup> e VERNILLI Fernando<sup>2,c</sup>

<sup>1</sup>CSN Cimentos do Brasil, Rio de Janeiro, Brazil

<sup>2</sup>Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brazil

<sup>a</sup>marcel.demarco@usp.br, <sup>b</sup>saracarvalho.sdc@gmail.com, <sup>c</sup>fernando.vernilli@usp.br

**Palavras-chave:** Cimento Ecossustentável, Clínquer Portland, Resíduos, Escória de Aciaria.

**Resumo.** No processo de produção do cimento ocorre um alto consumo de energia, utilização de matérias-primas naturais e enorme emissão de CO<sub>2</sub> na atmosfera, principalmente na fase de produção do clínquer. Atualmente, a indústria de cimento é responsável por cerca de 7% da emissão mundial de CO<sub>2</sub> e pode atingir 30% em 2050. A produção de cimentos sem clínquer é uma possibilidade que já vem sendo explorada em países como Rússia, Ucrânia, Polônia e Canadá. Neste processo, a escória granulada moída é misturada a produtos químicos, conhecidos como ativadores. Inúmeros produtos têm sido utilizados para ativar a escória, gerando cimentos com características interessantes para diferentes aplicações. No entanto o uso de produtos químicos como ativadores também tem impactos ambientais e nenhum dos cimentos alternativos desenvolvidos nestes países utiliza somente resíduos para sua fabricação. Neste trabalho foi desenvolvido um cimento a partir de mistura em proporções adequadas de resíduos siderúrgicos e resíduo da construção civil, demonstrando ser uma opção real de um aglomerante hidráulico 100% sustentável no que tange a redução significativa de impactos ambientais, tais como, evitar a lavra de minérios, reduzir o efeito estufa pela menor emissão de CO<sub>2</sub> e reaproveitar resíduos industriais diminuindo o passivo ambiental.

### Introdução

O cimento Portland (CP) é hoje um dos produtos inorgânicos mais importantes da indústria, e o material mais utilizado na indústria da construção civil, que vem apresentando um importante crescimento. O consumo per capita mundial de cimento equivale a 553 kg/habitante/ano, superior a média brasileira de 260 kg/habitante/ano. Entretanto, espera-se um relevante crescimento na produção até 2050, em função do elevado déficit habitacional e de infraestrutura aliados à expectativa de crescimento populacional de países emergentes [1, 2]. Em termos de valores, no caso brasileiro há a previsão de uma demanda de 120 a 140 milhões de toneladas de cimento/ano, e mundialmente este valor está entre 3700 e 4400 milhões de toneladas/ano [1, 2].

Apesar de impulsionar o crescimento industrial e o desenvolvimento socio-habitacional, a produção implica em graves questões ambientais, principalmente ligadas à extração de minerais, ao consumo de combustíveis fósseis e à liberação de gases do efeito estufa (GEE). Em especial, as emissões de CO<sub>2</sub> da indústria de cimento constituem cerca de 7% das emissões totais antrópicas, enquanto no Brasil, as emissões do setor representam cerca de 3% [1].

A redução da emissão no Brasil foi alcançada por uma série de medidas, que também vêm sendo implementadas na produção mundial de cimento, tais como a substituição de matérias-primas naturais por materiais descarbonatados; o uso de combustíveis a base de biomassa e ou derivados de resíduos; o aprimoramento da eficiência energética no processo e a criação de novas formulações de cimento [1]. Dentre essas medidas, destacam-se a substituição de matérias-primas naturais por materiais descarbonatados, incluindo o uso de adições minerais como escórias siderúrgicas e pozolanas artificiais, e a criação de novas formulações de cimento com semelhante comportamento mecânico ou de durabilidade do cimento Portland. Ambas as medidas tem em comum a redução do consumo de clínquer Portland, seja pela redução do seu conteúdo em formulações normalizadas de

cimento Portland, seja pelo desenvolvimento de novas formulas que não o empreguem, ou o utilizem em teores muito reduzidos.

Dentre os cimentos brasileiros de maior teor de substituição de clínquer estão o Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno (CPII E) e o Cimento Portland de alto-forno (CPIII), com a adição de 34% e 75% de escória granulada de alto-forno, respectivamente [3]. A redução do teor de clínquer consiste em uma importante ação mitigadora de emissão de CO<sub>2</sub>, como demonstrado pelo Sindicato Nacional da Indústria do Cimento (SNIC), uma vez que ao reduzir a razão clínquer/cimento para 52%, permitiria evitar que, até 2050, ocorresse a emissão cumulativa de 290 Mt de CO<sub>2</sub> para a atmosfera [1].

Por outro lado, novas formulações são desenvolvidas, em sua maioria, para evitar por completo o uso de clínquer, uma vez que a sua produção, através da descarbonatação do calcário, é responsável por mais de 60% das emissões de CO<sub>2</sub> da fabricação de cimento Portland [1]. Assim, podem ser destacadas formulações como a do cimento de silicato de magnésio, que exige menos calor e absorve CO<sub>2</sub> durante a manufatura; cimento de sulfoaluminato de cálcio, produzido a partir de uma mistura de calcário e bauxita; e do cimento supersulfatado, que emprega escória granulada de alto-forno moída como principal matéria-prima, sulfato de cálcio como ativador, e clínquer ou cal como ativador alcalino [4-6].

O cimento supersulfatado consiste em uma alternativa inovadora e uma opção viável para atender requisitos de desempenho em aplicações específicas. A produção de cimentos sem clínquer é uma possibilidade que já vem sendo explorada em países como Rússia, Ucrânia, Polônia e Canadá. Neste processo, a escória granulada moída é misturada a produtos químicos, conhecidos como ativadores. Inúmeros produtos têm sido utilizados para ativar a escória, gerando cimentos com características interessantes com diferentes aplicações [5-9].

Em função de sua composição equivaler a 75-85% de escória de alto-forno, 10-20% de sulfato de cálcio (gipsita, gesso hemidratado, fosfogesso) e 1-5% de ativador alcalino (clínquer, hidróxido de cálcio, cal, hidróxido de sódio), o cimento supersulfatado (CSS) é produzido, basicamente, a partir da etapa de moagem, uma vez que as matérias-primas não precisam ser calcinadas, elas são apenas submetidas a redução granulométrica, para finura de 400 a 500 m<sup>2</sup>.kg<sup>-1</sup>, e homogeneizadas, o que implica em baixo consumo de energia, menor emissão de GEE e reutilização de resíduos industriais.

O CSS apresenta propriedades específicas como baixo calor de hidratação, elevado tempo de pega; elevada resistência mecânica em idades tardias, aos 28 dias é comparável a resistência do CP; elevada resistência à reação álcali-agregado e ao ataque de sulfato. A sua produção é normalizada na Europa pela EN 15743, baseada na norma francesa NF P15- 313. Na Índia, a IS 6909 é a responsável pelas diretrizes e requisitos de composição, produção e ensaios do CSS. No entanto, no Brasil, não há registros normalizados para esta formulação [5, 6].

Frente as informações supracitadas, este trabalho foi realizado com a finalidade de estudar formulações que se assemelham a do CSS, na qual foram empregadas apenas resíduos industriais, sem a adição de cimento ou clínquer Portland. Do ponto de vista da conservação ambiental, acredita-se que essas formulações são significativamente influentes na redução das emissões de CO<sub>2</sub>. Entretanto, através do seu desempenho mecânico, serão verificadas as propriedades destes materiais comparadas as do cimento Portland.

## **Materiais e métodos**

**Obtenção e beneficiamento das matérias-primas.** A escória granulada de alto-forno utilizada no estudo foi gerada nos altos-fornos do processo de fabricação do ferro gusa da CSN (Companhia Siderúrgica Nacional). A amostra foi coletada na pilha de escória de alto-forno localizada no pátio de recebimento de matérias-primas da CSN Cimentos de acordo com a norma brasileira de amostragem de resíduos NBR 10007, compondo desta forma uma amostra representativa de aproximadamente 40 Kg. Toda a escória de alto-forno coletada foi quarteada até a obtenção de aproximadamente 20 Kg de amostra. A amostra resultante foi então seca em estufa a 100 °C.

A amostra de escória de aciaria LD, utilizada no estudo foi gerada no processo de fabricação do aço da CSN e coletada na pilha de escória de aciaria LD no pátio de recebimento de matérias-primas da CSN Cimentos de acordo com a NBR 10007, compondo desta forma uma amostra representativa de aproximadamente 30 Kg. Toda a escória de aciaria LD coletada foi quarteada até obtenção de aproximadamente 15 Kg de amostra e na sequência foi seca em estufa a 100 °C. A escória LD seca foi britada em um britador de mandíbulas até tamanho de partícula de 2,36 mm. Em seguida, foi utilizado imãs de neodímio de 3480 Gauss de aço inoxidável para remoção de ferro metálico remanescente.

O sulfato de cálcio utilizado no estudo foi o gesso reciclado provenientes da construção civil, incluindo resíduos como moldes, placas de drywall e resíduos de indústrias de porcelana e sanitários. Os resíduos de gesso foram submetidos inicialmente a limpeza manual para a remoção de contaminantes como plásticos, metais, madeiras e papeis, em seguida passou por homogeneização, moagem, peneiramento em peneira de abertura de 2,36 mm. A amostragem do gesso reciclado foi realizada no pátio de matérias-primas da CSN Cimentos, de acordo com a NBR 10007, acarretando a coleta de aproximadamente 40 Kg de gesso reciclado. A amostra foi quarteada até a obtenção de aproximadamente 20 Kg de gesso e na sequência seca em estufa à 40 °C.

**Caracterização das matérias-primas.** A caracterização química das escória de alto-forno e de aciaria LD foi realizada com o emprego da técnica de fluorescência de raios X por energia dispersiva (EDXRF). Utilizou-se o espectrômetro de fluorescência de raios X, marca Panalytical, modelo Axios, a partir de pastilhas fundidas em máquina de fusão marca Claisse, modelo M4, com fundentes a base da mistura de tetraborato de lítio/metaborato de lítio, marca Maxxiflux (66,67% de  $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$ , 32,83% de  $\text{LiBO}_2$  e 0,70% de  $\text{LiBr}$ ). A determinação da composição química do gesso foi no espectrômetro de fluorescência de raios X, a partir de pastilhas prensadas em máquina de prensagem marca Herzog, utilizando-se ácido esteárico ( $\text{C}_{18}\text{H}_{36}\text{O}_2$ ) da marca MERCK como aglutinante.

A técnica de difratometria de raios X pelo método de Rietveld foi empregada nas determinações das fases mineralógicas das matérias-primas e do grau de cristalinidade das escórias. Foi utilizado o equipamento Rigaku modelo Windmax 1000, operando na radiação  $K\alpha$  do cobre com 40KV – 20mA e varredura de 2°/min.

A técnica de microscopia óptica de luz transmitida polarizada foi utilizada para a determinação do grau de vitrificação das escórias de alto-forno e de aciaria LD. As escórias foram moídas em moinho de anéis e peneiradas via úmida nas peneiras ASTM #250 e #270. Todo o material retido na peneira ASTM #270 foi seco em estufa à 100 °C, por 30 minutos. Na sequência foi distribuído cerca de 2 mg de material em lâmina de vidro, utilizando gotas de álcool benzílico para a sua dispersão e homogeneização, e em seguida a amostra foi recoberta com lamínula de vidro. A lâmina foi fixada no *charriot* montado sobre a platina do microscópio e submetido à luz transmitida polarizada, sob ampliação aproximada de 150 vezes. Para cada escória foram realizadas as observações e contagem de aproximadamente 500 grãos, deslocando a lâmina linearmente por passos, em sentido ortogonal. O ensaio foi realizado em microscópio petrográfico de luz transmitida marca Zeiss, modelo AxioCam ERc 5S.

A reatividade das escórias foi avaliada através da adição de solução de NaOH 20% à escória, com superfície específica de 350  $\text{m}^2/\text{Kg}$ , para a moldagem de pastas de escórias e posterior avaliação da resistência à compressão, segundo NBR 7215 [10]. Para a cura acelerada, os corpos de prova foram mantidos em moldes cilíndricos em estufa a uma temperatura de  $55^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  durante  $23\text{h} \pm 15\text{ min}$  e para a cura normal os corpos de provas foram mantidos em moldes cilíndricos em sala climatizada com temperatura controlada de  $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade relativa  $\geq 50\%$  por 48 horas. Os corpos de provas foram rompidos na máquina de compressão modelo F-25EX-F-CPILOT, da marca Forney.

**Dosagem das misturas.** A escória de alto-forno e o gesso foram moídos em conjuntos, enquanto a escória de aciaria LD foi moída separadamente. Após as moagens, foram preparadas as composições das misturas sem clínquer conforme proporções estabelecidas na Tabela 1. Com o objetivo de comparar os resultados das resistências mecânicas à compressão das misturas sem

clínquer, foram preparadas formulações de cimentos supersulfatados conforme especificação da norma EN 15743 [11], Tabela 1. Para todas as formulações foram utilizadas as mesmas matérias-primas. Os ativadores alcalinos utilizados para compor os cimentos CSS foi o clínquer Portland da CSN Cimentos e o  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  PA da Synth.

Tabela 1: Formulações dos cimentos ecossustentável e supersulfatado

Misturas	Escória alto-forno + gesso [% p]	Escória aciaria LD [% p]
M0	100	0
M3	97	3
M6	94	6
M10	90	10

**Caracterização das composições de cimento.** A área superficial das misturas de cimentos foi avaliada pelo método de permeabilidade ao ar (NBR NM 76) [12], utilizando o Permeabilímetro de Blaine, marca Acmel, modelo BSA 1. A distribuição granulométrica, por difração a laser das misturas de cimento, foi realizada em equipamento da marca CILAS, modelo 1064L.

A alcalinidade da pasta das misturas de cimento foi medida com pH-metro Dgimed, modelo DM2, pelo preparo de pastas de cimento com uma relação fixa de água/cimento de 0,31.

A pasta de consistência normal, para cada mistura de cimento foi determinada conforme NBR 16606 [13]. Enquanto os tempos de início e fim de pega foram obtidos segundo NBR NM 65, utilizando agulha de Vicat, marca Soloteste. Foram realizadas as determinações das expansões de Lê Chatelier por método a quente e a frio, ambos prescritos na NBR 11582 [14]. A pozolanicidade das misturas de cimento foi avaliada conforme NBR 5733 [15], através do método Fratini.

Para a avaliação do comportamento mecânico das misturas de cimento, foram moldados 4 corpos de prova para cada idade de cura (1, 3, 7 e 28 dias) e rompidos em ensaio de resistência à compressão, seguindo a NBR 7215 [10]. Os ensaios das resistências mecânicas à compressão foram realizados através da prensa modelo F-25EX-F-CPILOT, da marca Forney.

## Resultados e discussões

**Caracterização das matérias-primas.** Os resultados da composição química da escória de aciaria LD e escória de alto-forno são exibidas na Tabela 2. Os índices de basicidade foram determinados conforme NBR 16697 e EN 15743. Equações 1 e 2, respectivamente. Os teores dos principais óxidos constituintes das escórias, Equação 3, também foram calculados conforme EN 15743 [11], Tabela 2.

$$IB4 = \frac{\text{CaO} + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}}{\text{SiO}_2} > 1,0 \quad (1)$$

$$IB3 = \frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2} > 1,0 \quad (2)$$

$$TO = \text{CaO} + \text{MgO} = \text{SiO}_2 > 66,7\% \quad (3)$$

Verifica-se que tanto a escória de aciaria LD quanto a escória de alto-forno apresentaram resultados do índice de basicidade com valores dentro dos limites especificados pelas normas NBR 16697 e EN 15743 [3, 11]. Observa-se também que a escória de aciaria LD apresenta índice de basicidade 3 vezes maior em relação a escória de alto-forno, caracterizando ser uma escória muito mais alcalina. Em relação aos teores de óxidos constituintes somente escória de alto-forno atendeu ao limite especificado pela norma EN 15743.

Tabela 2: Composição química e índices de basicidade das escórias de aciaria LD e de alto-forno

Escória	PF <sup>A</sup> [%]	Fe <sub>total</sub> [%]	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>B</sup> [%]	FeO <sup>C</sup> [%]	Fe <sup>0D</sup> [%]	CaO [%]	K <sub>2</sub> O [%]
Aciaria LD	0,44	21,2	10,4	17,5	0,22	42,9	0,14
Alto-Forno	0,38	0,89	< 0,01	1,02	0,21	40,4	0,4

Escória	S <sub>total</sub> [%]	SiO <sub>2</sub> [%]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	MgO [%]	IB4 > 1,0	TO > 66,7	IB3 > 1,0
Aciaria LD	0,11	11	4,07	8,03	4,3	64,9	4,1
Alto-Forno	0,58	39	9,89	6,81	1,56	86,70	1,24

Notas: <sup>A</sup> – ensaio realizado por gravimetria na temperatura de 750 °C; <sup>B</sup> – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> calculado por estequiometria; <sup>C</sup> – Determinação realizada por volumetria; <sup>D</sup> – Determinação realizada por espectrometria de absorção atômica.

Na Tabela 3 é apresentado o resultado da composição química do gesso. A partir dos valores percentuais foi possível determinar por estequiometria, o grau de pureza considerado relativamente elevado (> 95%).

Tabela 3: Composição química do gesso, em % mássica

Composto	SiO <sub>2</sub>	CaO	SO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O
Teor [%]	0,9	29,57	43,57	95,85

A composição mineralógica das escórias de alto-forno e de aciaria LD e do gesso estão apresentadas na Tabela 4. Verifica-se que a fase predominante no gesso consiste na gipsita (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O), indicando que o material é oriundo de processo de hidratação das fases anidras ou hemi-idratadas, bem como, que o processo de preparação da matéria-prima não resultou na remoção de água, dado os baixos teores de bassanita e anidrita.

Tabela 4: Composição mineralógica das escórias de aciaria LD, de alto-forno e do gesso

Fases mineralógicas	Fórmula química	Notação	Aciaria LD [%]	Alto-Forno [%]	Gesso [%]
Belita	β-2CaO.SiO <sub>2</sub>	β-C <sub>2</sub> S	33,3	-	-
Brownmillerita	Ca <sub>2</sub> Fe <sub>1,4</sub> Mg <sub>0,3</sub> Si <sub>0,3</sub> O <sub>5</sub>	-	24,2	-	-
Wustita	FeO	-	23,7	-	-
Óxido de cálcio	CaO	C	5,6	-	-
Calcita	CaCO <sub>3</sub>	CC	5,5	0,1	-
Quartzo	SiO <sub>2</sub>	S	3,4	0,8	-
Guelenita	2CaO.SiO <sub>2</sub> .Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	C <sub>2</sub> AS	1,9	-	-
Dolomita	CaMg(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	CMC	1,3	-	-
Portlandita	Ca(OH) <sub>2</sub>	CH	0,8	-	-
Ferro metálico	Fe	-	0,3	-	-
Gipsita	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	C $\bar{S}$ H <sub>2</sub>	-	-	91,3
Bassanita	CaSO <sub>4</sub> .1/2H <sub>2</sub> O	-	-	-	0,4
Anidrita	CaSO <sub>4</sub>	C $\bar{S}$	-	-	1,5

Quanto às escórias, observa-se para a escória de aciaria LD a presença de algumas fases minerais comumente encontrados no clínquer Portland como a Portlandita Ca(OH)<sub>2</sub> e em maior quantidade a Belita (β-2CaO.SiO<sub>2</sub>), e elevado percentual das fases wustita e brownmillerita.

A escória de alto-forno apresentou grau vítreo de 99%(método Rietveld), fato justificado pela forma de resfriamento brusco em água no vazamento do alto-forno. Assim a solidificação ocorrendo rapidamente, a formação de um sólido cristalino com periodicidade e simetria será dificultada.

Enquanto no resfriamento lento, da escória de aciaria, possibilita-se uma maior mobilidade dos íons facilitando a maior formação de fases cristalinas, como foi identificado.

Os resultados do grau de vitrificação das escórias, a partir da técnica de contagem por microscopia óptica de luz transmitida, corroboram estes resultados, como pode ser verificado na Tabela 5. Observa-se que a escória de alto-forno apresentou grau cristalinidade predominantemente vítreo, 98,4%, valor muito próximo ao obtido por Rietveld, e a escória de aciaria LD apresentou uma estrutura predominantemente cristalina, característica que certamente tende a influenciar em sua reatividade.

Tabela 5: Grau de vitrificação e reatividade, por resistência à compressão, das escórias de alto-forno e aciaria LD

Escória	Total Grãos	Concentração [%]		Resistência à Compressão [MPa]	
		Cristalino	Vítreo	24 horas	48 horas
Alto-forno	518	1,62	98,38	13,8	8,1
Aciaria LD	524	98,80	1,20	4,2	2,2

A reatividade das escórias, avaliada através das resistências mecânicas à compressão (RC) pelo método acelerado em solução de NaOH 20%, é exibida na Tabela 5. Observa-se que a escória de alto-forno apresentou resultados de resistências mecânicas à compressão superiores à escória de aciaria LD, justificado pelos diferentes graus de cristalinidade entre as escórias. O método acelerado, com incremento da temperatura teve influência em ambos materiais. Desta forma após 24 horas de cura, a  $\pm 55$  °C, a RC da escória de alto-forno foi cerca de duas vezes maior do que a escória de aciaria, enquanto após 48 h, foi cerca de quatro vezes, evidenciando a superior reatividade da escória de alto-forno.

**Caracterização físico-química das formulações de cimento.** Na Tabela 6 estão apresentados os resultados das superfícies específicas e da distribuição granulométrica das misturas sem clínquer, demonstrando que em termos de tamanho de partícula, há uma grande semelhança entre todas as formulações, uma vez que no presente estudo foi definido que as formulações de cimento se manteriam com uma superfície específica na faixa de 550 m<sup>2</sup>/Kg. Assim consistem em cimentos de elevada finura, o que auxilia na reatividade e hidratação das misturas.

Tabela 6: Superfície específica e distribuição granulométrica das misturas sem clínquer

Misturas	Superfície específica	Diâmetro equivalente [µm]			
	Blaine [ m <sup>2</sup> /Kg]	D10	D50	D90	DM
M0	550	1,44	8,76	27,48	11,71
M3	553	1,46	8,74	27,11	11,61
M6	557	1,44	8,65	26,29	11,39
M10	560	1,43	8,55	26,43	11,36

Os resultados da pasta de consistência normal sem clínquer estão apresentados na Tabela 7, sendo possível observar que os valores se mantiveram próximos, e indicando um leve aumento na demanda de água em função da dosagem da escória de aciaria LD.

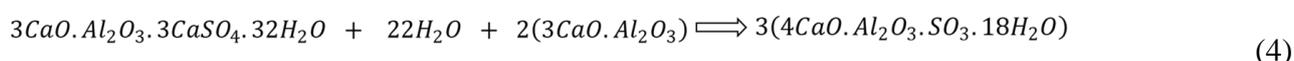
Tabela 7: Resultados da pasta de consistência normal e tempos de pega das misturas sem clínquer

Misturas	Consistência normal [%]	Tempo de pega [min]		Tempo de fim de pega – CPE: 600 min
		Início	Fim	
M3	29,0	465	580	Tempo de fim de pega – CPPIII: 720 min
M6	29,1	365	425	
M10	29,3	530	630	

Os resultados do tempo de início e fim de pega das misturas sem clínquer, apresentados na Tabela 7, demonstram diferentes comportamentos para as diferentes formulações, e que todas apresentaram tempo de final de pega inferior aos limites normativos referentes aos cimentos CPII E e CP III. Não são apresentados resultados referentes ao cimento M0, em função da sua baixa velocidade de hidratação, provavelmente devido a ausência de escória de aciaria LD, o que impossibilitou a realização das análises.

Os diferentes comportamentos de tempo de pega das misturas sem clínquer estão associados à quantidade de etringita formada e à velocidade de formação do composto de monosulfo-aluminato. A etringita é geralmente o primeiro hidrato a cristalizar-se devido a elevada relação sulfato/aluminato na fase aquosa durante a primeira hora de hidratação.

A velocidade e a quantidade de etringita formada irá depender da quantidade de escória de aciaria LD presente, responsável por elevar a alcalinidade do meio acelerando os processos de dissolução e precipitação dos compostos hidratados, como a etringita [16]. Após determinado tempo, o gesso já foi totalmente consumido e começa a transformação da etringita em monosulfo-aluminato de cálcio,  $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SO_3 \cdot 18H_2O$  ( $C_4ASH_{18}$ ), que resulta da combinação da etringita com aluminato tricálcico ainda existente, conforme reação exibida na Equação 4.



À medida que a etringita é consumida também se forma aluminato hidratado de cálcio hexagonal, que pode formar uma solução sólida com o monosulfo-aluminato de cálcio ou individualizar-se em cristais [17]. Todas estas reações são muito complexas, envolvendo a formação de soluções sólidas, não se tendo ainda chegado a um consenso sobre o que efetivamente ocorre.

Para a mistura M3, devido à menor quantidade de escória de aciaria LD e conseqüentemente menor alcalinidade do meio, o consumo da gipsita para a formação da etringita ocorreu de forma mais lenta, levando maior tempo formação de monosulfo-aluminato. Para a mistura M6 o tempo de pega foi mais acelerado em relação às demais misturas, devido a maior velocidade de decomposição da gipsita e a quantidade de formação da etringita em tempo hábil para transformação em monosulfo-aluminato.

Acredita-se que para a mistura M10, a velocidade de decomposição da gipsita em etringita ocorreu de forma mais rápida devido à maior alcalinidade da mistura, no entanto ocorreu a formação de excesso de etringita levando maior tempo para consumo e transformação em monosulfo-aluminato.

Na Figura 1 estão apresentados os resultados da expansibilidade de Le Châtelier, para os quais verifica-se que em função da adição de escória de aciaria LD nas misturas, a expansão teve um acréscimo, devido a escória de aciaria LD apresentar em sua composição compostos expansivos como  $CaO_{livre}$  e  $MgO_{livre}$ . Entretanto, todas as misturas apresentaram resultados inferiores ao limite especificado pela norma NBR 16697 [3].

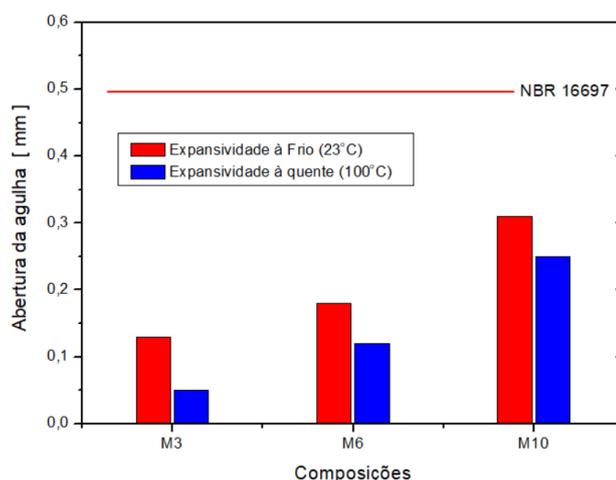


Figura 1: Resultados da expansibilidade de Le Châtelier

Os resultados da alcalinidade das pastas das misturas sem clínquer são exibidos na Figura 2. A alcalinidade das misturas aumentou proporcionalmente à medida em que se foi elevado o teor de escória de aciaria LD, o que pode ser justificado pela superior basicidade da escória de aciaria LD, tornado desta forma o meio mais alcalino.

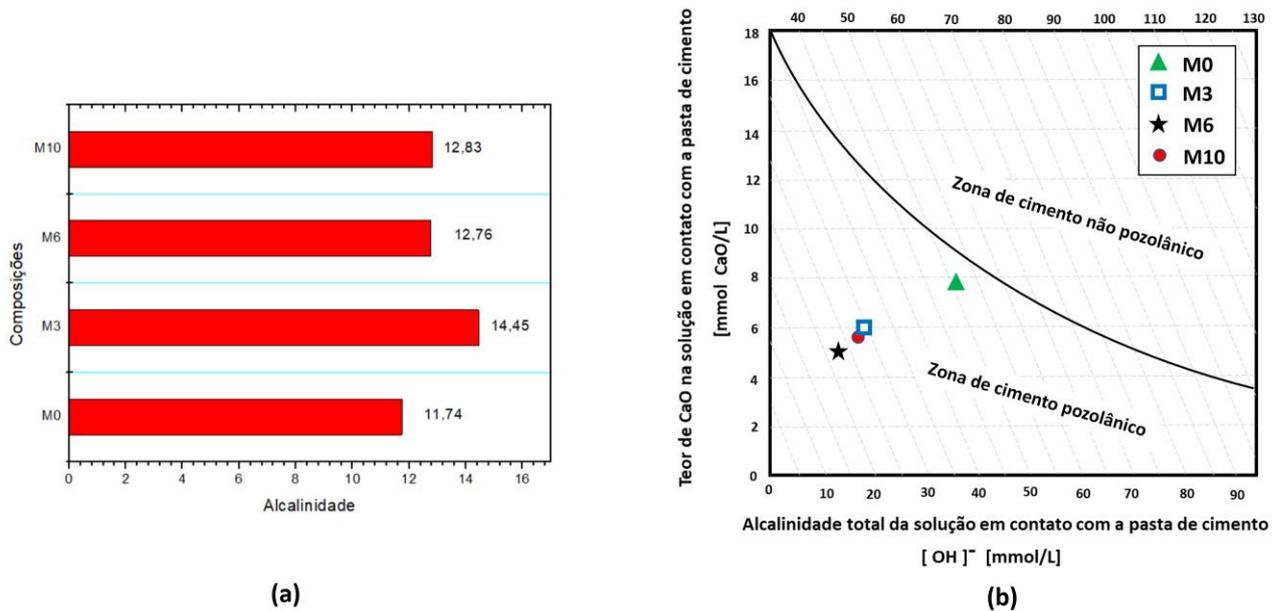


Figura 2: Resultados da alcalinidade (a) e pozolanicidade (b) das pastas das misturas estudadas

Os resultados do ensaio da pozzolanicidade das misturas sem clínquer, apresentados na Figura 2, evidenciam que todos os cimentos avaliados apresentam pozzolanicidade. Atribui-se este comportamento a adição de escória de aciaria LD, que proporcionou maior caráter pozzolânico para as misturas sem clínquer, o que pode ser justificado pelo fato da escória de aciaria LD durante o processo de hidratação das misturas, ter disponibilizado maior quantidade de  $\text{Ca(OH)}_2$  proveniente da decomposição do  $\beta\text{-2CaO.SiO}_2$  e da hidratação do  $\text{CaO}$ , reagindo desta forma com silicatos provenientes da escória de alto-forno para formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H) [16]. Ademais, verifica-se que todos os cimentos se mantiveram com valores próximos, com exceção do BSF, que não continha escória de aciaria LD, e assim se aproximou da curva de cimento não pozzolânico.

**Caracterização do comportamento mecânico das formulações de cimento.** Os resultados da resistência mecânica à compressão das misturas sem clínquer são exibidos na Figura 3 mediante a comparação com os limites normativos (linhas tracejadas) dos cimentos CP III-32 e CPII E-32, conforme especificação da NBR 16697, por consistirem nos cimentos brasileiros de maior teor de escória de alto-forno.

Na Figura 3 os valores de resistência à compressão das misturas sem clínquer foram também comparados com os limites normativos do cimento supersulfatado – CSS 32,5 N, segundo EN 15743. Verifica-se que as misturas M3 e M6 atingiram os limites normativos das resistências à compressão do cimento supersulfatado 32,5 N aos 7 e 28 dias de cura.

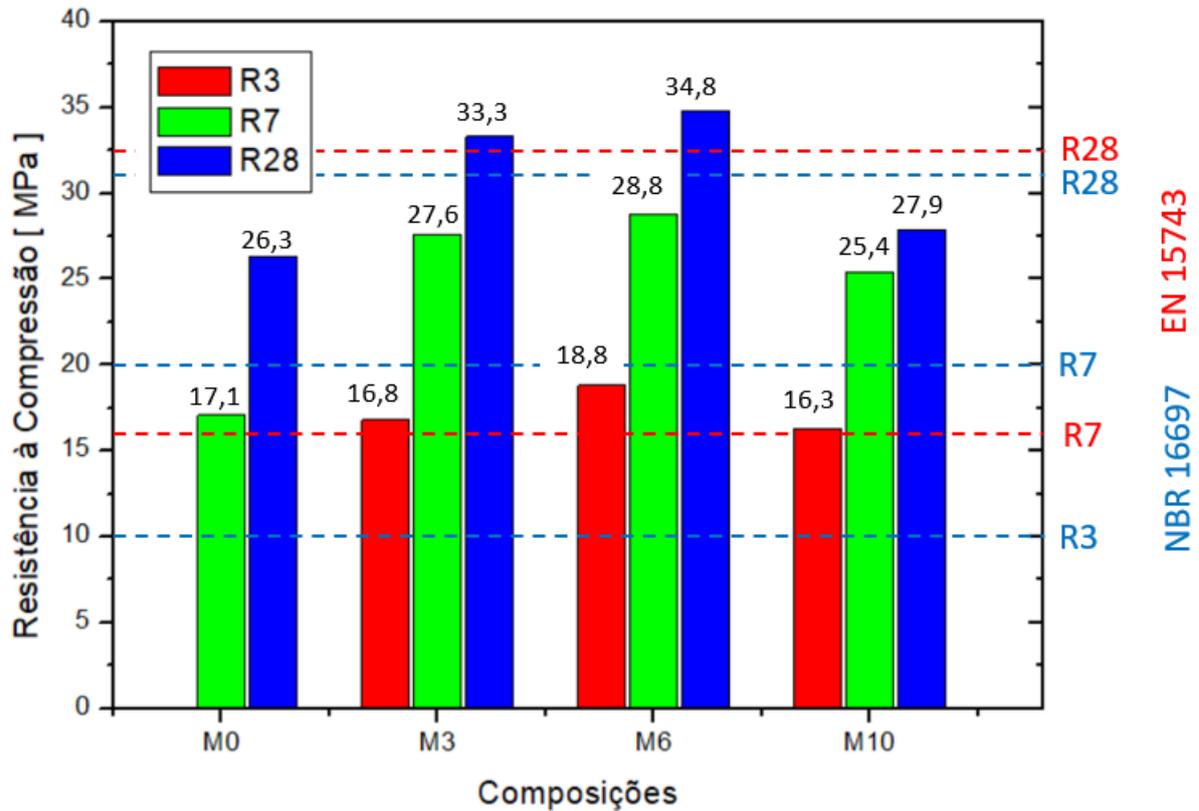


Figura 3: Resistências mecânicas à compressão das misturas sem clínquer comparadas aos limites normativos do cimento Portland (CPIII-32 e CPII E-32) e cimento supersulfatado (CSS 32,5 N)

Para a mistura M0, não foi possível realizar a avaliação das resistências à compressão para as idades de 1 e 3 dias de cura devido ao lento processo de hidratação, impossibilitando inclusive que o material fosse desenformado com 24 horas de cura, conforme apresentado na Figura 4.

Já para as demais misturas contendo adições de escória de aciaria LD, foi possível constatar o desenvolvimento do processo de hidratação, sendo possível desenformar e realizar as medições das resistências mecânicas à compressão com 24 horas de cura. Os diferentes comportamentos dos resultados das resistências mecânicas à compressão podem ser justificados pela ação ativadora que a escória de aciaria LD proporcionou ao meio através do efeito da alcalinidade e pozolanicidade [16].



Figura 4: Mistura BSF desenformada após 24 horas de cura

Para as misturas contendo adições de escória de aciaria LD, foi possível observar que as misturas M3 e M6 apresentaram melhores desempenhos de resistências mecânicas à compressão ao longo das idades em comparação com a mistura M10. E conseqüentemente, observa-se que quando comparado aos limites normativos dos cimentos CII-E e CP-III, somente as misturas M3 e M6 atenderam aos limites normativos em todas as idades. Estes diferentes comportamentos observados podem ser justificados pelos seguintes fatores:

1) A maior presença de escória de aciaria LD proporcionou maior caráter alcalino nas diferentes misturas sem clínquer favorecendo desta forma o rápido processo dissolução e precipitação de compostos hidratados já nas idades iniciais.

2) Por outro lado, a menor quantidade de mistura de escória de alto-forno e gesso proporcionou menor disponibilidade de elementos como a  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{SO}_3$  influenciando desta forma na formação de compostos hidratados ao longo das idades.

A Figura 5 mostra a microestrutura da composição M6 com 91 dias de cura, evidenciando a formação da fase etringita em pequenas agulhas e da fase tobermorita no formato placas e que a microestrutura ainda está em evolução, dado que as agulhas de etringita tende a formar o C-S-H gel [18].

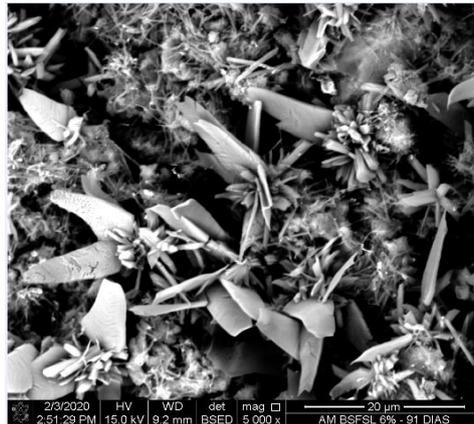


Figura 5: Imagem da microestrutura da mistura M6 com 91 dias de cura

## Conclusão

Neste trabalho foi possível concluir que as misturas sem clínquer nas composições M3 e M6 apresentaram características físico-mecânicas compatíveis ao cimento Portland convencional tipo CPIII-32 e CPII E-32 e ao cimento supersulfatado CSS 32,5 N. Foi possível constatar que a presença da escória de aciaria LD em diferentes dosagens proporcionou a hidratação das misturas sem clínquer já nas idades iniciais de cura, através da elevação da alcalinidade das misturas contribuindo desta forma para a aceleração da velocidade de dissolução dos componentes químicos da escória de alto-forno e a antecipação da precipitação de compostos hidratados como a etringita, bem como pelo efeito pozolânico, elevando a disponibilidade do  $\text{Ca(OH)}_2$  para formação do C-S-H nas idades mais avançadas.

## Referências

- [1] *ROADMAP tecnológico do cimento: potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050*. Rio de Janeiro: SNIC, 2019.
- [2] PCA - Portland Cement Association. *Roadmap to Carbon Neutrality*. Illinois: PCA, 2021.
- [3] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16697. Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.
- [4] Battagin, Arnaldo. *O Cimento do futuro*. CONCRETSHOW, A FERIA DO CIMENTO E CONCRETO PARA A CONSTRUÇÃO. São Paulo: ABCP, 2019.
- [5] Phelipot-Mardelé, A.; Lanos, C.; Samson, G.; Baux, C. *Super sulfated cement: formulation and uses*. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON CONSTRUCTION MATERIALS: Performance, Innovations and Structural Implications, v. 5, p. 19-21, 2015.
- [6] Wu, Q.; Xue, Q; Yu, Z. *Research status of super sulfate cement*. Journal of Cleaner Production. v. 294, (2021) 126-228.

- [7] John, V.M.; *Cimentos de escória ativada com silicatos de sódio*. 1995. Tese (Doutorado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1995.
- [8] Wang, S. D.; Pu, X. C.; Scrivener, K. L.; Pratt, P. L. *Alkali-activated slag cement and concrete: a review of properties and problems*. *Advances in Cement Research*. v. 7, (1995) 93-102.
- [9] Ding, Yao; Dai, Jian-Guo; Shi, Cai-Jun. *Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-the-art review*. *Construction and Building Materials*. v. 127, (2016) 68-79.
- [10] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7215: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, p.1-12. 2019.
- [11] EN 15743:2010, E. Supersulfated cement — Composition, specifications and conformity criteria. CEN, 2010.
- [12] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 76. Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 16606: Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, p.1-8. 2018
- [14] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 11582. Cimento Portland -Determinação da expansibilidade Le Chatelier. Origem: MB-3435. Rio de Janeiro, 2012.
- [15] ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5733. Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- [16] Oliveira, H. M. *Cimento Portland*. In: BAUER, L.A.F. (Coord.). *Materiais de construção*. 5. Ed. Rio de Janeiro: LTC. 2015
- [17] Odler, I. *Hydration, setting and hardening of Portland cement*. In: HEWLETT, P.C. *Lea's Chemistry of Cement and concrete*. 5th Edition. Elsevier, 1998
- [18] Franus, W.; Panek, R and Wdowin, M. *Sem Investigation of Microstructures in Hydration Products of Portland Cement*. *Springer Proceedings in Physics* 164. *Proceedings of. InterM*, (2014) 105-112.

## Incorporação de lamas provenientes do corte de rochas ornamentais em materiais cimentícios

MOREIRA Othon<sup>1,a</sup>, MALHEIRO Raphaele<sup>1,b</sup>, DE JESUS Carlos<sup>1,c</sup>,  
CAMÕES Aires<sup>1,d</sup> e RIBEIRO M.J.<sup>2,e</sup>

<sup>1</sup>CTAC - Centro de Território, Ambiente e Construção, Universidade do Minho, Campus de Azurém, 4800-058, Guimarães, Portugal

<sup>2</sup>UIDM - Materials Research and Development Center, Polytechnic Institute of Viana do Castelo - Rua da Escola Industrial e Comercial de Nun'Álvares, 4900-347, Viana do Castelo, Portugal

<sup>a</sup>aathonmoreira@gmail.com, <sup>b</sup>raphamalheiro@gmail.com, <sup>c</sup>cjesus@civil.uminho.pt,  
<sup>d</sup>aires@civil.uminho.pt, <sup>e</sup>ribeiro@estg.ipv.pt

**Palavras-chave:** Lamas, Basalto, Materiais Cimentícios, Sustentabilidade, Economia Circular.

**Resumo.** O desenvolvimento da economia mundial impulsiona a procura por cimento e os desafios ambientais associados à sua fabricação continuam a preocupar os investigadores. O setor de cimento é o terceiro maior consumidor industrial de energia e o segundo maior emissor industrial de CO<sub>2</sub>. Neste sentido, algumas medidas têm sido implementadas. Para além da redução da relação clínquer/cimento através da maior utilização de cimentos compostos, a redução do consumo de cimento através da utilização de Materiais Cimentícios Suplementares em substituição parcial do cimento é uma estratégia eficiente e atual. A utilização de resíduos industriais como, por exemplo, as lamas provenientes do corte de rochas ornamentais, tem sido uma aposta que favorece, também, o desenvolvimento da economia circular. Neste sentido, foi desenvolvida uma pesquisa experimental com o objetivo principal de avaliar o comportamento de argamassas cuja composição utiliza lamas provenientes do corte de rochas ornamentais produzidas em Portugal, nomeadamente, travertino (calcário), gabro e granada. A inclusão do basalto também foi avaliada. Foram estudadas propriedades das argamassas no estado fresco e endurecido após 28 e 90 dias de cura. O índice de atividade pozolânica também foi determinado. Os resultados sugerem um desempenho satisfatório das argamassas com lamas e basalto face às argamassas de referência. Assim, as lamas estudadas, além de promoverem a economia circular, têm potencial para se apresentar como substituto parcial do cimento na produção de materiais cimentícios com utilizações específicas.

### Introdução

Temas como aquecimento global, escassez de energia, extinção de recursos naturais, deposição adequada de resíduos e economia circular tornaram-se um assunto quotidiano, fruto das constantes notícias dos efeitos vivenciados atualmente como: temperaturas extremas, desastres naturais, poluição, pandemias, extinção de espécimes, dentre outros.

A União Europeia visando mudar este cenário estipulou metas conjuntas, em diversas frentes de trabalho. Entre as mais importantes cita-se a procura pela neutralidade carbónica e a redução dos consumos energéticos. Neste contexto, a indústria do cimento passou a ser objeto de muitas investigações, pois é considerada um dos alvos prioritários.

O betão é um dos produtos mais consumidos no planeta. São cerca de 14 bilhões de metros cúbicos utilizados a cada ano, sendo que este número deve crescer entre 12 e 23% até 2050 [1]. A emissão de gases de efeito estufa do setor é tão grande que se fosse considerada como um país, seria o terceiro mais poluente, atrás apenas da China e dos Estados Unidos. A produção de cimento, ligante base do betão, gera cerca de 7% das emissões globais de CO<sub>2</sub> [2]. Este percentual supera em três vezes o volume produzido por todo o tráfego aéreo do planeta. Para cada tonelada de cimento fabricada são lançados exatamente o mesmo volume de CO<sub>2</sub> na atmosfera [2]. Os números são tão expressivos que qualquer ação que possa vir a apresentar melhorias neste processo, mesmo que

pequenas, permitirá ganhos enormes, pois os efeitos serão potencializados devido ao seu elevado uso.

Passados longos anos após os primeiros registos de seu uso, ainda não se desenvolveu um substituto à altura para o cimento. Sendo assim, é necessário assumir uma postura de torná-lo mais ecológico, reduzindo ao máximo os seus impactos ao meio ambiente. A indústria do cimento reduziu o CO<sub>2</sub> em 19,2% por tonelada de cimento desde 1990 [1]. Alterações no processo produtivo têm produzido redução no consumo de energia. O uso de aditivos minerais na produção de cimento vem crescendo ano a ano. A quota de clínquer de cimento reduziu de 85% em 2003 para 77% em 2010, estimando-se que possa chegar, na Europa, a 71% em 2050 [3,45,46]. O consumo de energia durante a produção de cimentos com aditivos é muito menor do que no caso da produção de cimento Portland CEM I [4]. Investigações atuais têm procurado encontrar substituições parciais do cimento, tentando não só reduzir o consumo de matéria-prima nobre, como também possibilitando a inserção de resíduos no processo, alguns inclusive já consolidados.

Em Portugal, utilizava-se as cinzas volantes oriundas da geração de energia a partir da queima do carvão, porém as centrais a carvão foram encerradas, no âmbito das medidas implementadas para atingir a meta da neutralidade carbónica, e com isto surgiu a necessidade de encontrar, de maneira célere, um substituto para elas. Em 2011, 3,6 bilhões de toneladas de cimento foram produzidas em todo o mundo [5], com previsão de que este número chegue a 5,8 bilhões de toneladas até 2050 [6]. As cinzas volantes e as escórias apresentam mundialmente produções anuais na ordem de 1 bilhão de toneladas e 360 milhões de toneladas, respetivamente [6,7]. Porém, não se pode assumir que esta produção seja suficiente e garanta volumes necessários. A decisão por uma redução das emissões de CO<sub>2</sub> tende a afetar esta produção e deve-se considerar também questões logísticas quanto ao local onde se produz o resíduo e as fábricas de cimento. É preciso haver uma análise minuciosa neste processo, com uma perspectiva de ciclo de vida, pois os ganhos gerados com a introdução do resíduo podem ser facilmente perdidos no transporte da matéria-prima. A questão é complexa, pois a solução deve ter em conta não só os requisitos técnicos, como também fatores que possam afetar a cadeia de produção e que permita alcançar os efeitos desejados.

Na literatura, a utilização de resíduos de rochas ornamentais em compósitos cimentícios tem sido objeto de alguns estudos: o resíduo do polimento de granito foi utilizado na fabricação de betão, resultando em melhor empacotamento de partículas, redução de porosidade e ganho de resistência, com teor ótimo de 20%, de acordo com M.A. Alves [8]; nos estudos de A.A. Aliabdo et al. [9] verificou-se a manutenção e melhora das propriedades mecânicas dos betões produzidos com a adição de pó de mármore; M. Sardinha et al. [10] e H.S.Arel [11] pesquisaram o comportamento mecânico do betão com substituição parcial do cimento, observando bons resultados para níveis de substituição de 10%; [12] avaliou as propriedades pozolânicas de resíduos do beneficiamento de rochas ornamentais após tratamento térmico a 1200 °C, observando um aumento significativo da resistência mecânica, principalmente para os betões com adição de 10%.

Tendo estes conceitos como base, fez-se este estudo na tentativa de obter um material com características semelhantes, que fosse abundante, barato, com disponibilidade local, que permitisse agregar valor a um resíduo e que não alterasse de maneira relevante as propriedades do betão. Para tal testaram-se alguns resíduos da exploração de pedras ornamentais, nomeadamente lamas de travertino (calcário), granada, gabros (rochas ígneas) e basalto, analisando o comportamento de pastas produzidas com a substituição, em volume, de 25% do ligante (cimento) comparadas a uma pasta convencional. Pretende-se analisar o impacto na resistência à compressão relativamente à pasta de referência e verificar a pozolanicidade destas lamas.

## **Origem dos materiais**

As lamas utilizadas são um resíduo gerado durante a extração e processamento de pedras ornamentais, usadas na construção. Esses resíduos, após a secagem tornam-se um pó, que representa um alto risco ambiental. A poeira libertada na atmosfera contribui significativamente para a acumulação e dispersão nociva de sólidos finos no ar, água e solo [13].

A composição química e mineral da lama é a mesma do leito rochoso de onde tem origem, com a ressalva de que o resíduo gerado pode ser contaminado durante o processo de sua extração e/ou tratamento de acordo com o método utilizado. O seu uso em betão e argamassa ocorre principalmente como aditivos inertes e o seu efeito positivo em algumas propriedades das argamassas e betões está relacionado principalmente com o efeito de filler (material fino de enchimento), que resulta no adensamento da estrutura da matriz cimentícia e, assim, na melhoria dos parâmetros mecânicos e na durabilidade. No entanto, nem todas as lamas oriundas do processamento de agregados minerais são totalmente inertes [2]. No entanto, alguns estudos demonstram efeitos pozolânicos nas lamas de calcário [14] e basalto [15,16].

Globalmente, a indústria de rochas ornamentais processa cerca de 68 milhões de toneladas de rocha por ano. A produção mundial é dominada por: China, Itália, Índia, Portugal, Brasil, Turquia, EUA, Grécia, França e África do Sul, todos com produção superior a um milhão de toneladas por ano [17]. O processo produtivo usa água para arrefecer e lubrificar as máquinas de serrar e polir. Este tipo de extração e preparação da pedra resulta na produção de cerca de 20 a 30% de resíduos na forma de lama [18-23]. Algumas investigações indicam que até 58% da rocha extraída é desperdiçada, dos quais 18% são resíduos (lama) resultantes do polimento [24]. O mais importante não é precisar as percentagens deste desperdício, mas sim observar que o volume é bastante significativo e que, independentemente do processo explorativo, o resíduo produzido é extremamente danoso para o ambiente. A lama é armazenada em tanques para decantação e em seguida é depositada em aterro, gerando a redução da permeabilidade do solo, afetando não só o nível do lençol freático como também a fertilidade do solo [25,26]. Por outro lado, após a secagem desta lama, parte do material dissipa-se através de um pó, extremamente fino, contaminando também o ar.

A indústria de exploração de pedras trabalha com uma grande diversidade de rochas. A escolha das pedras deste estudo deveu-se ao facto de serem materiais com grande presença nacional e pelo facto de não haver um uso corrente para o resíduo produzido no processo de exploração.

### Caracterização física dos materiais

**Granulometria laser.** Diversos estudos têm sido feitos utilizando-se métodos para melhorar a condição do material através da calcinação ou redução do tamanho das partículas. Sob a ótica de uma análise de ciclo de vida, evitou-se ao máximo estas ações para não haver incremento de gastos energéticos no processo de reintrodução destes resíduos. Os resíduos foram utilizados nos ensaios no estado “in natura”, ou seja, conforme vieram das empresas de processamento. O material foi seco em estufa (a 105°C) para garantir que a relação água / ligante não fosse afetada por eventual água residual incorporada. O material apresentava-se em forma de pequenos pedriscos (pedras miúdas) que eram facilmente convertidos em pó, conforme se pode observar na Figura 1. Para garantir que pequenos grânulos fossem dispersos, eles passaram por uma mistura prévia de 30 segundos, em água da própria amassadura.



Figura 1: Lamas após a secagem (pó de rocha)

Apenas o basalto passou por um processo de moagem, devido ao facto de se apresentar originalmente em forma de pedras (não era pó como os demais). Este material, foi processado primeiramente no britador de mandíbulas, através de dois ciclos sucessivos de britagem, e depois passou por 35 ciclos de moagem, de 15 minutos cada, em moinho de bolas (Los Angeles), com 20

esferas de ferro fundido (massa igual a 8,408 kg), conforme descrito na NP EN 1097-2 [27], até que fosse possível aferir a sua granulometria dentro da mesma faixa dos demais (80% de passagem), através da peneiração a 63  $\mu\text{m}$ .

A solução adotada para a determinação da curva granulométrica foi o método de difração a laser, através do equipamento Malvern – Mastersizer 3000. Desta forma foi possível obter valores mais precisos e detalhados. Analisando o gráfico da Figura 2, pode-se afirmar que as lamas apresentam uma granulometria semelhante à do cimento utilizado, ou seja, um tamanho de partícula da mesma ordem de grandeza.

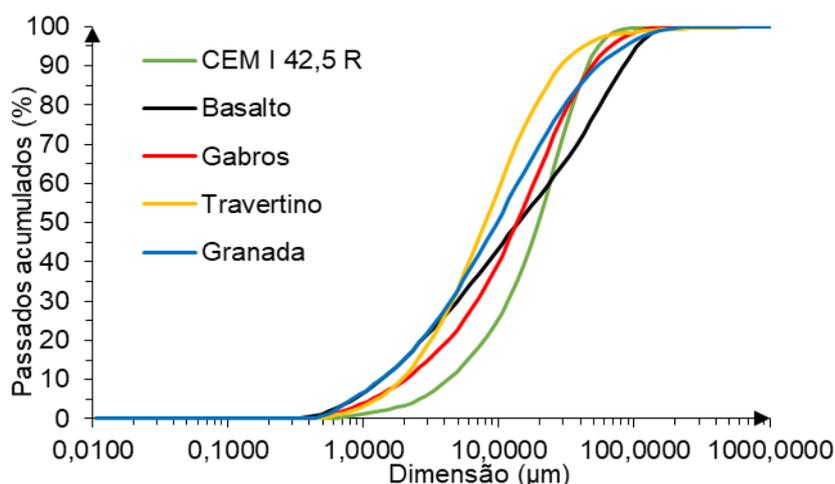


Figura 2: Curva granulométrica dos materiais estudados

Nos diâmetros característicos, apresentados na Tabela 1, pode-se notar que os valores de D10 de todas as lamas ficaram ligeiramente abaixo, porém na mesma ordem de grandeza daqueles apresentados pelo cimento utilizado. Em relação ao D50 e ao D90, nota-se que as lamas apresentam grãos característicos menores que os do cimento, sendo o travertino (calcário) o material que apresenta a maior diferença, principalmente na faixa dos grãos maiores (D90). De um modo geral, as lamas possuem grãos ligeiramente mais finos que os do cimento utilizado.

Tabela 1: Diâmetros característicos dos materiais em estudo

Material	D10	D50	D90
CEM I 42.5R	3.53	24.00	109.00
Travertino	2.89	11.40	36.40
Gabros	2.22	15.00	52.50
Granada	1.48	10.10	59.90
Basalto	1.48	15.40	94.70

A granulometria do resíduo pode variar de acordo com o processo de beneficiamento da rocha. Para evitar a influência deste fator procurou-se utilizar materiais oriundos da mesma fonte de extração, embora no caso específico do basalto, houvesse a necessidade de moer posteriormente o material.

**Superfície específica/massa volúmica.** Em virtude de diversos estudos já terem demonstrado a importância da finura do material na determinação de seus efeitos pozolânicos, determinou-se a superfície específica de Blaine (NP EN 196-6) [28] e a massa volúmica (EN 1097-6) [29] do cimento e das lamas, cujos resultados podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2: Massa Volúmica e Superfície Específica dos materiais em estudo

Material	Massa Volúmica				Superfície Específica		
	Massa da Amostra (g)	V1	V2	P (cm <sup>3</sup> /g)	Se (cm <sup>2</sup> /g)	Desvio Padrão	Coef. Variação
CEM I 42.5R	65.07	0.45	20.90	3.182	4026	-	-
Travertino	53.06	0.60	19.65	2.785	8665	545.86	6.30%
Gabros	55.04	0.45	20.20	2.787	5946	181.45	3.05%
Granada	58.89	0.75	20.05	3.051	7816	388.61	4.97%
Basalto	65.02	0.35	21.80	3.031	5164	105.36	2.04%

Os resultados apresentados na Tabela 2 confirmam que as lamelas são muito finas, da mesma ordem de grandeza da do cimento, porém mais finas, sendo dotados de uma maior superfície específica.

**Composição química dos materiais.** A composição química da lama, obtida por FRX (Hitachi – EA1000VX), tem uma influência significativa na sua reação no compósito de cimento. Na Tabela 3, pode-se notar que no travertino o componente predominante foi o óxido de cálcio (82,51%). O gabro possui um alto teor de sílica (66,93%). Já o granada apresenta óxido de cálcio (39,67%), ferro (21,10%) e sílica (30,65%) como principais componentes. Em relação ao basalto o componente predominante é a sílica. (54,38%).

Tabela 3: Composição Química dos materiais em estudo

Resíduos	Elementos químicos (%)													
	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	K <sub>2</sub> O	S	Na <sub>2</sub> O	NaOeq	PF	RI
CEM I 42.5R	62.77	3.06	20.25	4.43	-	2.01	3.11	-	0.76	-	0.25	0.75	2.74	1.23
Travertino	82.51	1.11	13.23	2.01	0.02	-	-	0.10	0.57	0.37				
Gabros	6.10	6.85	66.93	16.32	0.11	-	-	0.46	2.92	0.26				
Granada	39.67	21.10	30.65	4.77	0.58	-	-	2.22	0.62	0.33				
Basalto	9.05	14.93	54.38	15.63	0.29	-	-	3.05	1.75	-				

## Procedimentos e ensaios

**Dosagem.** Para determinar a massa de resíduo (substituição) a utilizar na amassadura respectiva, primeiro calculou-se o volume de cimento a substituir (VC) e, depois, foi determinada a massa de resíduo correspondente que ocupava esse mesmo volume (VC), para cada material correspondente, levando-se em consideração a massa volúmica de cada um dos materiais, conforme Tabela 4.

Isto foi feito mantendo-se a quantidade de areia e água e substituindo 25% do ligante (volume de cimento) por quatro tipos diferentes de lamelas (travertino, gabros, granada e basalto). A relação água / ligante foi mantida em 0,50. Usou-se areia fina, natural e siliciosa com diâmetro máximo de 500 µm, módulo de finura 2,10 e densidade de 2620 kg/m<sup>3</sup>.

Partindo de uma mistura de referência com o traço 1:1, composta por: cimento Portland CEM I 42,5R, areia fina monogranular e água, estabeleceu-se a composição conforme se indica na Tabela 4. Foram moldados provetes de 20 x 20 x 20 mm, para serem ensaiados à compressão, 5 amostras por idade, aos 7, 28 e 90 dias.

Tabela 4: Identificação e composição das argamassas (kg/m<sup>3</sup>)

Material	Cimento	Areia	Água	Resíduo
CEM I 42.5R	835.38	835.38	417.69	-
Travertino	626.52	835.38	417.69	187.39
Gabros	626.52	835.38	417.69	187.39
Granada	626.52	835.38	417.69	205.27
Basalto	626.52	835.38	417.69	203.94

**Amassadura.** Utilizando-se uma balança, com precisão de 0,01g, e misturadora mecânica, efetuou-se para cada composição a pesagem dos materiais e a posterior homogeneização das misturas conforme se indica em seguida:

- Para a mistura de referência, começou-se por combinar a areia com o cimento. Depois adicionou-se a água;

- Para as restantes misturas, começou-se por dispersar as lamas (pedriscos) na água e só depois se juntou o cimento e a areia.

**Trabalhabilidade.** A trabalhabilidade e a consistência são importantes propriedades dos materiais cimentícios. A demanda de água e a trabalhabilidade dependem em grande parte da área superficial específica dos componentes da mistura. Entretanto, A.M. Neville [30] observou que a trabalhabilidade não depende simplesmente da superfície específica do material; partículas de agregado menores que 150  $\mu\text{m}$  não requerem humedecimento tão elevado quanto no caso de grãos grossos. A influência da área superficial específica de grão fino na trabalhabilidade da mistura de material cimentício não é, no entanto, definida com precisão [30]. A elevação da quantidade de material de grão fino na massa de cimento altera as suas propriedades reológicas, afetando a trabalhabilidade. A substituição do cimento por um material de mais fino contribui para o aumento do consumo de água, que está relacionada com o aumento da área superficial específica do grão. No entanto, o aumento da área superficial específica nem sempre leva ao aumento do consumo de água. A adição de cinzas volantes à mistura de material cimentício pode reduzir a necessidade de água para a mesma trabalhabilidade em 5 a 15%, o que está relacionado ao formato dos grãos das cinzas volantes [30]. A forma esférica e a superfície lisa dos grãos das cinzas volantes produzem o efeito "rolamento de esferas". Este fenómeno contribui para a redução do atrito interpartículas e, deste modo, para melhorar a trabalhabilidade.

Alguns autores [31,32] demonstraram que a adição de lamas, em substituição ao cimento, em alguns casos melhora as propriedades reológicas das argamassas e das misturas de betão e tem um efeito positivo na interação física. Devido ao tamanho de grão muito pequeno, ocorre um aumento na densidade de empacotamento, reduzindo o volume de vazios. Isto ocorre porque a alta densidade de empacotamento de partículas faz com que menos água fique presa entre os grãos e, portanto, mais água esteja disponível para hidratar os grãos.

Após a amassadura das misturas, efetuou-se para cada uma delas o ensaio de espalhamento, utilizando a mesa de espalhamento conforme a EN 1015-3 [33]. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 3.

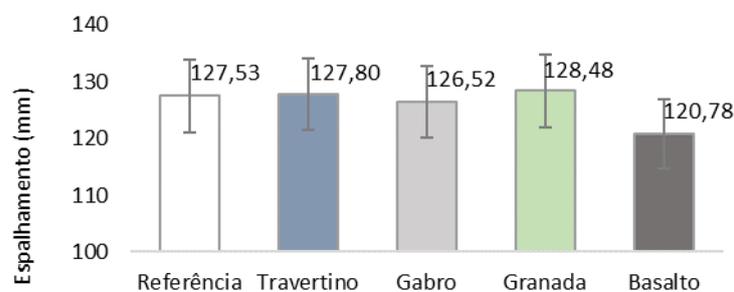


Figura 3: Resultado do ensaio de espalhamento dos materiais

Nos ensaios realizados percebe-se que não houve perdas ou ganhos significativos com a introdução dos materiais utilizados. Aquele que apresentou uma melhor condição em comparação à referência foi a granada, que ficou em torno de 1% acima. Já o basalto apresentou um valor abaixo do valor de referência, na ordem de 5%. Porém, as percentagens estão dentro de uma faixa aceitável, não chegando, portanto, a comprometer a trabalhabilidade da mistura.

**Moldagem e cura dos provetes.** Utilizando moldes cúbicos de 20mm de aresta, fizeram-se 15 provetes de cada uma das argamassas. Encheram-se os moldes com o auxílio de colher pequena, realizando o enchimento por camadas, para minimizar a presença de vazios. Colocou-se os moldes na mesa de espalhamento para compactar (15 pancadas) e retirar o excesso de ar. A superfície foi então regularizada com o auxílio de uma espátula.

Após o preenchimento dos moldes com as misturas, estes foram cobertos com filme de plástico e armazenados em câmara húmida ( $18 \pm 2^\circ\text{C}$ ,  $93 \pm 2\%$  HR) durante 48 horas. Em seguida, os provetes de argamassa foram retirados dos moldes e colocados num tanque com água. Após os diferentes

períodos de cura, aos 7, 28 e 90 dias, o ensaio de resistência à compressão foi realizado de acordo com a NP EN 196-1 [34].

## Apresentação e discussão dos resultados

**Resistência à compressão.** Uma hora antes do início dos ensaios, em cada uma das idades, os provetes foram retirados da água e secos em estufa (105°C). Após a secagem os provetes foram numerados, pesados em balança de precisão e tiveram as suas dimensões aferidas com paquímetro. Para a compressão foi utilizado prensa hidráulica Loyd com capacidade para 50 kN e os resultados obtidos constam na Tabela 5 e são graficamente apresentados na Figura 4.

Tabela 5: Resistência à compressão das composições estudadas

Mistura	Tempo de cura (dias)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	DP (kg/m <sup>3</sup> )	CV (%)	Tensão de rotura à compressão (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
Referência CEM I 42.5	7	2041.43	10.34	0.51	29.76	1.51	5.08
	28	2061.87	12.01	0.58	40.39	3.55	8.80
	90	2071.83	27.94	1.35	50.99	0.94	1.85
Travertino	7	1991.92	14.39	0.72	23.17	1.92	8.29
	28	2075.75	9.85	0.47	26.36	1.70	6.45
	90	1993.02	35.66	1.79	29.63	2.66	8.99
Gabros	7	1949.36	25.61	1.31	15.25	0.97	6.36
	28	2009.45	23.95	1.19	26.38	1.77	6.70
	90	1992.96	25.86	1.30	27.39	1.96	7.17
Granada	7	1966.76	13.89	0.71	16.88	0.98	5.78
	28	2001.43	20.05	1.00	21.82	1.71	7.85
	90	1972.67	18.71	0.95	24.31	1.48	6.11
Basalto	7	2100.98	28.45	1.35	23.20	1.48	6.37
	28	2164.99	9.40	0.43	31.19	2.13	6.84
	90	1987.34	14.49	0.73	44.98	1.94	4.31

De acordo com a Figura 4, em geral existe uma tendência de redução nos valores de resistência à compressão para as argamassas com incorporação de lamas provenientes de rochas ornamentais, independentemente da idade, quando em comparação com a argamassa de referência. O material que apresentou a maior redução (na ordem de 50%) foi a granada. Em relação ao basalto, apesar de haver também uma redução, nota-se uma evolução ao longo do tempo, apresentando valores mais próximos à referência (88% aos 90 dias), o que pode ser considerado bastante promissor, confirmando deste modo os resultados apresentados na literatura atual.

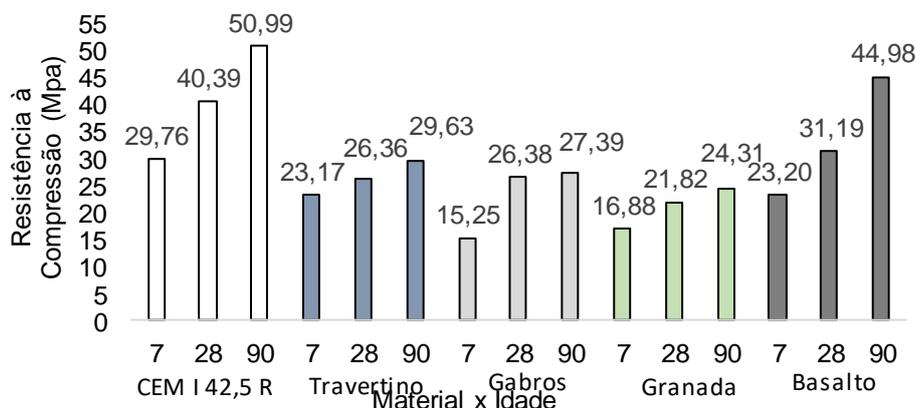


Figura 4: Evolução da resistência à compressão das composições estudadas

A substituição parcial do cimento por lamas (pó de pedra) geralmente resulta na deterioração dos parâmetros de resistência da argamassa, fruto do menor teor de cimento. A incorporação de novos materiais na mistura altera o processo de hidratação do cimento, através de interações físicas e/ou químicas. A reação química está principalmente relacionada às suas propriedades pozolânicas. Aditivos pozolânicos ativos são normalmente dissolvidos nas zonas porosas de elevada alcalinidade da pasta de cimento, libertando iões siliciosos na fase líquida (H<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub>) - [4,35]. Esses iões reagem

em solução com íons de cálcio para produzir uma fase CSH, tanto nos poros da pasta como também na superfície das partículas do aditivo.

Investigações disponíveis indicam alguma atividade pozolânica de algumas lamas (calcário e basalto) [36-38]. No entanto, na maioria dos casos, o impacto da lama na hidratação do cimento está relacionado principalmente com a sua interação física, fruto de fenômenos sobrepostos: aumento da relação água / ligante efetiva e o preenchimento dos poros por partículas duras e de alta resistência mineral.

No caso do basalto, a influência na taxa de hidratação do cimento não parece estar relacionada apenas com o efeito físico, mas também químico. Uma grande área de pó de basalto pode facilitar a cristalização dos produtos de hidratação do cimento, o que contribui para o aumento do grau de hidratação. M.E.I. Saraya [38] observou que o efeito da adição do basalto de grão fino na hidratação do cimento pode ser dividido em duas etapas. No primeiro estágio o basalto atua como um enchimento e o seu efeito na hidratação inicial do cimento está relacionado com a interação física, o que é consistente com os resultados de trabalhos de outros autores sobre o efeito de vários aditivos cristalinos de granulização fina, na hidratação do cimento [39,40]. A segunda etapa consiste em reações minerais mais lentas no agregado, com os íons em solução na pasta de cimento. Alguns minerais encontrados no basalto reagem mais facilmente com os íons maioritariamente presentes nas zonas porosas do betão (argamassa), para formar uma fase de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) amorfa ou microcristalina e uma fase intermédia de silicato aluminato de cálcio hidratado (C-A-S-H) [38].

A substituição parcial do cimento por um material com granulometria mais fina e maior área superficial específica do que o cimento leva ao aumento do número de sítios de nucleação dos produtos de hidratação. Como os hidratos podem ser cristalizados não apenas nas partículas de cimento, mas também na superfície do grão da lama, a taxa e o grau de hidratação das fases do clínquer são aumentados. Isso resulta numa quantidade adicional de fase CSH, menor porosidade da matriz de cimento e, portanto, maior resistência da pasta, especialmente no início do período de hidratação [32].

**Atividade pozolânica (NP 450-1).** A pozolanicidade de um material, ou a sua capacidade de consumir hidróxido de cálcio (portlandite, CH) e formar silicato de cálcio hidratado (C-S-H), é determinante para conferir condições a este material como substituto do cimento. Existem vários métodos em uso para medir a pozolanicidade de um material. Tendo como referência a NP 450-1 [41], determinou-se o índice de atividade para cada uma das misturas (nas devidas idades), conforme se apresenta na Tabela 6.

Tabela 6: Índice de atividade dos materiais por idade

Mistura		Tempo de cura (d)	Índice de atividade (%)
Travertino	25%	7	78
		28	65
		90	58
Gabros	25%	7	51
		28	65
		90	54
Granada	25%	7	57
		28	54
		90	48
Basalto	25%	7	78
		28	77
		90	88

A NP 450-1 [41] estabelece que o índice de atividade deve ser superior a 75% aos 28 dias, e 85% aos 90 dias. Estabelece, ainda, um limite inferior de 70% para 28 dias e 80% para 90 dias. Conforme se pode notar nos dados da Tabela 6, o único material que atendeu aos requisitos normativos foi o basalto, indicando que este material tem contributo positivo na mistura, mesmo apresentando alguma redução no que diz respeito à resistência à compressão. Os restantes materiais

ficaram bastante abaixo dos mínimos requeridos pela norma, o que permite afirmar que nas condições em que foram utilizados, sem qualquer tratamento prévio (“in natura” desde a origem) tendem a não possuir atividade pozolânica significativa e o seu uso na mistura pode ser definido como inerte, com redução considerável no desempenho mecânico devido a alteração no processo de hidratação da pasta, uma consequência das alterações na relação efetiva água / ligante.

**Análise Termogravimétrica (ATG).** O ensaio de termogravimetria tem sido utilizado cada vez mais para a determinação da atividade pozolânica dos materiais. A avaliação das regiões de variação de massa e energia em função da temperatura permite identificar as reações de desidratação do material. A perda de massa na temperatura em que a portlandite se decompõe, na faixa de 450-550°C [42], permite confirmar a ocorrência da reação pozolânica.

Se um material pozolânico é adicionado na pasta, ocorre consumo de parte do  $\text{Ca(OH)}_2$  pelas reações pozolânicas durante a cura. Então, o teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  detectado na ATG da pasta com pozolana é menor do que em uma pasta de cimento sem adições. Ou seja, quanto maior a pozolanicidade do material, menor será o teor de  $\text{Ca(OH)}_2$  detectado na ATG [43]. Percentagem de Portlandite por material estudado, relativamente à referência pode ser vista na Tabela 7.

Tabela 7: Percentagem de Portlandite por material, relativamente à referência

Material	TGA - % Portlandita							
	Simples = CaOH/ Massa inicial		Residual = CaOH/ Massa 500°C		Normalizado = Residual/ 0.75		% em relação à Referência	
	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias	28 dias	90 dias
Referência	11.85	11.73	15.68	15.08	15.68	15.08	-	-
Travertino	8.83	9.35	11.24	11.33	14.98	15.11	95.56	100.18
Gabros	9.75	8.99	12.35	10.77	16.46	14.35	104.99	95.19
Granada	9.76	9.19	12.49	11.14	16.66	14.86	106.23	98.54
Basalto	9.10	9.91	11.65	12.32	15.53	16.42	99.05	108.91

Na hidratação do cimento, alguns produtos podem ser detectados pelo método das curvas de ATG e DTG (diferencial da ATG). Nomeadamente o gesso não reagido na faixa de temperatura entre 140-170 °C, o gel do C-S-H a temperaturas abaixo de 150°C, etringita em temperaturas de 120-130°C, hidróxido de cálcio na faixa de 450-550°C, e carbonato de cálcio a 750-850 °C [42,44].

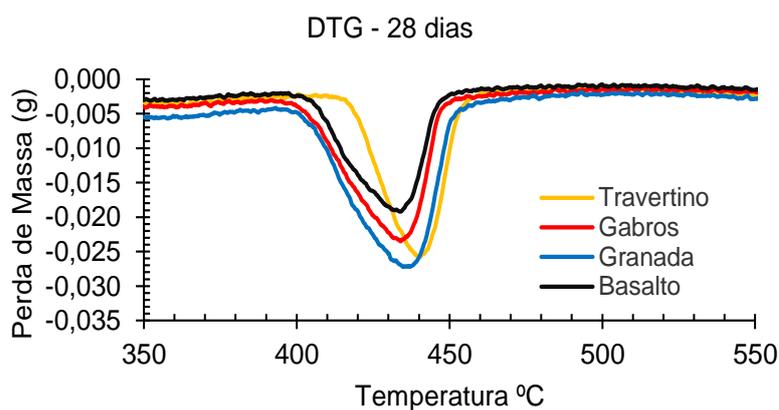


Figura 5: Gráfico da DTG dos materiais aos 28 dias, na zona de decomposição do CH

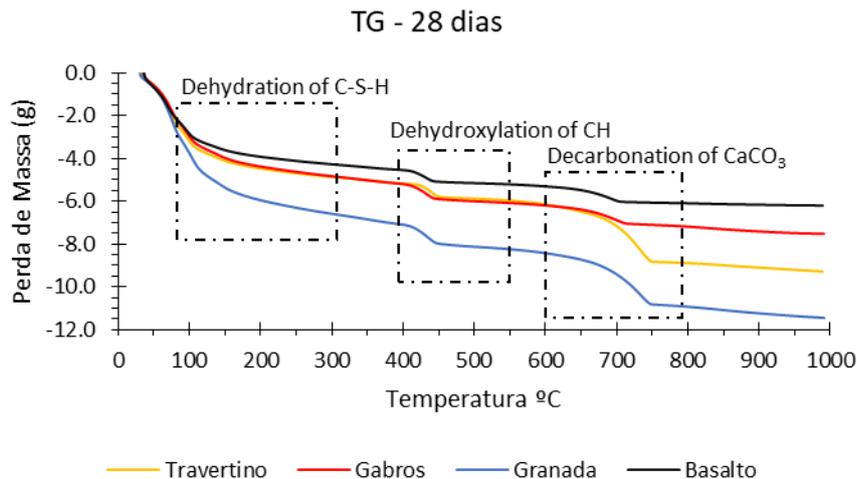


Figura 6: Gráfico da ATG dos materiais estudados, aos 28 dias

Conforme se pode notar nas Figuras 5 e 6, o basalto foi o material que apresentou melhor desempenho, ou seja, evidenciou uma menor perda de massa com o aumento da temperatura.

Quando se analisa a evolução das percentagens de portlandite normalizada, devido à percentagem de 25% de substituição (Tabela 7), nota-se, porém, que não houve grandes variações em relação à pasta de referência, pois as percentagens variaram entre 95,19% e 108,91%, estando numa faixa semelhante às ocorridas nas amostras dos ensaios à compressão (coeficiente de variação). Aos 28 dias, travertino (calcário) e o basalto apresentaram índices praticamente iguais ao da pasta sem incorporações, enquanto gabros e granada apresentaram pequena variação positiva na ordem de 5%, o que pode indicar que o efeito físico destes materiais, provavelmente, permitiu uma melhor hidratação do cimento nas primeiras idades. Aos 90 dias, ocorreu uma ligeira inversão nesta tendência. O travertino (calcário) permanece praticamente igual à referência, enquanto o basalto se mostrou ligeiramente superior, aproximadamente 9% maior. Já quanto aos gabros e à granada apresentaram índices ligeiramente inferiores, não chegando a 5% de redução.

Os resultados demonstraram que o efeito físico das incorporações afetou a formação da portlandita nas pastas. As variações das percentagens de portlandite identificadas, após normalização, foram muito pequenas, o que nos leva a crer que não existiu atividade pozolânica significativa. Apesar disto, os resultados são promissores e indicam a necessidade de ampliar os estudos em relação à incorporação do basalto.

## Conclusões

De um modo geral houve diminuição acentuada da resistência à compressão nas argamassas com incorporação dos resíduos em estudo, exceto no caso do basalto, cuja redução foi menos intensa, mas ainda assim relevante.

Esse resultado deve-se à presença do material inerte, como substituto do cimento, alterando o processo de hidratação do cimento e com influência direta na razão água/ligante efetiva.

O basalto indicou ser um material interessante, requerendo, no entanto, estudos mais detalhados sobre seu uso, incluindo os seus efeitos a longo prazo (durabilidade). Segundo a NP 450-1 [41] o mesmo atinge os requisitos para ser considerado um material pozolânico. No entanto, tendo em consideração as análises termogravimétricas este fato não foi evidenciado de forma muito relevante, pois após a normalização a percentagem de portlandite ficou muito próxima da referência.

## 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 e UIDP/04047/2020, e no âmbito do projeto com a referência 2000.03197.PTDC, GlassCON.

## Referências

- [1] Global Cement and Concrete Association (GCCA) - <https://gccassociation.org/>, acesso em 15 de agosto de 2022.
- [2] Madalena Dobiszewska, *Waste Materials Used in Making Mortar and Concrete*, Journal of Materials Education, 9 (5-6) (2017) 133-156.
- [3] M.C.G. Juenger and R. Siddique, *Recent advances in understanding the role of supplementary cementitious materials in concrete*, Cem. Concr. Res. 78, (2015) 71.
- [4] W. Kurdowski, *Peculiar Set-Retarding Effect of Miserly Amounts of Pyrocatechol on Calcium Aluminate Cement Hydration*, Cement and Concrete Chemistry, Springer, London, (2014) 676.
- [5] Cembureau, *The European Cement Association Activity Report*, 2011.
- [6] K. Scrivener, *Issues in sustainability in cements and concrete*, Am. Ceram. Soc. Bull.91 (2012) 47–50.
- [7] V.M.Malhotra, *Reducing CO<sub>2</sub> emissions—the role of fly ash and other supplementary cementitious materials*, Concr. Int. 28 (2006) 42–45.
- [8] M. S. Alves. *Estudo das características e da viabilidade do uso de resíduos gerados no polimento de rochas graníticas como adição em concretos*, Dissertação Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- [9] A.A. Aliabdo, A.M. Elmoaty, E.M. Auda, *Re-Use of Waste Marble Dust in the Production of Cement and Concrete*, Constr. Build. Mater. 50 201, (2014) 28–41.
- [10] M. Sardinha, J. Brito, R. Rodrigues. *Durability properties of structural concrete containing very fine aggregates of marble sludge*, Constr. Build. Mater.119, (2016) 45-52.
- [11] H.S. Arel. *Recyclability of waste marble in concrete production*, J. Cleaner Prod. 131, (2016) 179-188.
- [12] Shm Mittri, Mk Degen, GL Vieira, JS Vazzoler e LHCH Rodrigues. *Avaliação da atividade pozolânica de resíduos de rochas ornamentais após tratamento térmico e seu efeito nas propriedades mecânicas de concretos*. Revista IBRACON de Estruturas e Materiais, (2018) vol. 11, nº 6.
- [13] K. Vardhan, S. Goyal, R. Siddique and M. Singh, *Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement*, Constr. Build. Mater. 96, (2015) 615.
- [14] M. Heikal M., H. El-Didamony and M.S. Morsy, *Limestone-filled pozzolanic cement*, Cem. Concr. Res. 30, (2000) 1827.
- [15] C. Yüksel, A. Mardani-Aghabaglou, A. Beglarigle, H. Yazici, K. Ramyar and O. Andic-Cakir, *Influence of water/powder ratio and powder type on alkali-silica reactivity and transport properties of self-consolidating concrete*, Mater. Struct. 49, (2016) 289.
- [16] M.A. Abdelaziz, S. Abd El-Aleem and W.M. Menshawy, *Effect of fine minerale in local quarry dust of limestone and basalt on the properties of Portland cement paste and mortars*, Int. J. Eng. Res. Techn. 3, (2014) 1038.
- [17] N. Almeida, F. Branco, J. de Brito and J.R. Santos, *High-performance concrete with recycled stone slurry*, Cem. Concr. Res. 37, (2007) 210.

- [18] A. Aliabdo, A.M. Elmoaty and E.M. Auda, *Re-use of waste marble dust in the production of cement and concrete*, Constr. Build. Mater. 50, (2014) 28.
- [19] H.Y. Aruntas, M. Gürü, M. Day and I. Tekin, *Utilization of waste marble dust as an additive in cement production*, Mater. Des. 31, (2010) 4039.
- [20] E. Bacarji, R.D. Toledo Filho, E.A.B. Koenders, E.P. Figueiredo and J.L.M.P. Lopes, *Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete fillers*, Constr. Build. Mater. 45, (2013) 1.
- [21] H. Binici, H. Kaplan and S. Yilmaz, *Influence of marble and limestone dusts as additives on some mechanical properties of concrete*, Sci. Res. Essay 2, (2007) 372.
- [22] B. Demirel, *The effects of waste marble dust applying as a fine sand on the mechanical properties of concrete*, Cement Wapno Beton 5, 2 (2010) 59.
- [23] M. Gesoglu, E. Guneyisi, M.E. Kocabag, V. Bayram and K. Mermerdas, *Fresh and hardened characteristics of self compacting concrete made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash*, Constr. Build. Mater. 37, (2012) 160.
- [24] Rana A, Kalla P, Verma H K and Mohnot J K, *Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review*, Journal of Cleaner Production 135, (2016) 312-331.
- [25] K. Vardhan, S. Goyal, R. Siddique and M. Singh, *Mechanical properties and microstructural analysis of cement mortar incorporating marble powder as partial replacement of cement*, Constr. Build. Mater. 96, (2015) 615.
- [26] A. Rana, P. Kalla, H.K. Verma and J.K. Mohnot, *Recycling of dimensional stone waste in concrete: A review*, J. Cleaner Prod. 135, (2016) 312-331.
- [27] NP EN 1097-2, 2002, Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados, Parte 2: métodos para a determinação da resistência à fragmentação, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- [28] NP EN 196-6, 2019, Métodos de ensaio de cimentos - Parte 6: determinação da finura, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- [29] NP EN 1097-6, 2004, Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 6: determinação da massa volúmica e da absorção de água, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- [30] A.M. Neville, *Properties of Concrete*, Longmans, Harlow, Essex 1995
- [31] M. Nehdi, S. Mindess and P.C. Aitcin, *Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles*, Cem. Concr. Res. 28(5), (1998) 687.
- [32] Y. Knop, A. Peled and R. Cohen, *Influences of limestone particle size distributions and contents on blended cement properties*, Constr. Build. Mater. 71, (2014) 26.
- [33] EN 1015-3:2001/A2:2007 - Methods of test for mortar for masonry - Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)
- [34] NP EN 196-1, 2017, Métodos de ensaio de cimentos - Parte 1: determinação das resistências mecânicas, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- [35] H. Uchikawa, *Effect of blending components on hydration and structure formation*, 8th IC CC Rio de Janeiro 1, 250 (1986).
- [36] L. Laibao, Y. Yunsheng, Z. Wenhua, Z. Zhiyong and Z. Lihua, *Investigating the influence of basalt as mineral admixture on hydration and microstructure formation mechanism of cement*, Constr. Build. Mater. 28, (2013) 434.

- [37] I. Soroka and N. Setter, *The effect of fillers on strength of cement mortars*, Cem. Concr. Res. 7, (1977) 449.
- [38] M.E.I. Saraya, *Study physico-chemical properties of blended cements containing fixed amounts of silica fume, blast furnace slag, basalt and limestone, a comparative study*, Constr. Build. Mater. 72, (2014) 104.
- [39] E. Berodier, *Impact of the supplementary cementitious materials on the kinetics and microstructural development of cement hydration*, Ph.D. Thesis, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne 2015, 156.
- [40] E. Berodier and K. Scrivener, *Understanding the filler effect on the nucleation and growth of C-S-H*, J. Am. Ceram. Soc. 97, 3(2014) 764.
- [41] NP EN 450-1, 2006, cinzas volantes para betão - Parte 1: definição, especificações e critérios de conformidade, Lisboa: Instituto Português da Qualidade.
- [42] Rêgo, J. H. S. *As cinzas de casca de arroz (CCAs) amorfa e cristalina como adição mineral ao cimento—aspectos de microestrutura das pastas*. 2004. Tese de Doutorado. Tese de Doutorado. Faculdade de Tecnologia. UNB. Brasília, 2004, 274.
- [43] Costa, L. M. *Influência da pozolanicidade na ativação alcalina*. 2020. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Curso de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais.
- [44] Ramachandram, V. S. *Thermal analysis*. In: Handbook of Analytical Techniques in Concret Science and Technology. J. Building Material series. 2001. 127-173.
- [45] International Energy Agency – Cement Roadmaps 2009 – [www.iea.org/roadmaps](http://www.iea.org/roadmaps), acesso em 15 de agosto de 2022
- [46] M. Schneider, M. Romer, M. Tschudin, H. Bolioc, *Sustainable cement production present and future*, Cem. Concr. Res. 41 (2011) 642–650.

## Sistema construtivo em painéis pré-fabricados de madeira para edifícios em altura – Análise do desempenho térmico

TENÓRIO Marina<sup>1,a</sup>, SILVA Sandra M.<sup>1,b</sup> e BRANCO Jorge M.<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia (ISISE), Campus de Azurém, 4800-058 Guimarães, Portugal

<sup>a</sup>tenorio.mcu@gmail.com, <sup>b</sup>sms@civil.uminho.pt, <sup>c</sup>jbranco@civil.uminho.pt

**Palavras-chave:** Edifícios em Madeira, Construção em Altura, Coeficiente de Transmissão Térmica, Proteção Contra Humidade, Isolamento Sonoro.

**Resumo.** Como estratégia de crescimento para uma economia competitiva, eficiente no aproveitamento de recursos e, conseqüentemente, alinhada com o desenvolvimento sustentável, uma das prioridades enunciadas pela União Europeia é o alcance da neutralidade carbónica até 2050. Na sequência, Portugal estipulou a redução das emissões de gases com efeito de estufa entre 85%-90%. É nesse contexto que a revisão dos sistemas construtivos convencionais se torna prioritária, dado o elevado impacto ambiental associado ao setor da construção. A madeira, então, ressurge como material de construção promissor, em alternativa ao betão e ao aço, devido à sua capacidade de armazenamento de carbono e menor energia incorporada. Nas últimas décadas, a difusão dos edifícios de madeira em altura, principalmente em países de clima frio promoveu o desenvolvimento do conhecimento e a proposta de soluções adequadas a este cenário específico, mas que não se aplicam propriamente à realidade portuguesa. De maneira a compatibilizar essa tipologia construtiva ao contexto português, foi definido um sistema construtivo para edifícios multifamiliares até 5 pisos recorrendo a painéis pré-fabricados de madeira, concebido para atender às necessidades locais e atuar como ferramenta no cumprimento dos objetivos nacionais de neutralidade carbónica. Visando desenvolver um sistema que proporcione conforto térmico e acústico aos ocupantes e que seja adequado às exigências regulamentares de desempenho dos edifícios em Portugal, neste trabalho, os painéis de madeira são avaliados quanto ao coeficiente de transmissão térmica e proteção à humidade através do programa Ubakus. As previsões de desempenho indicaram resultados favoráveis em termos de desempenho térmico, mesmo para a zona climática mais rigorosa do território nacional (I3), bom comportamento higroscópico e potencial para se manterem livres de condensações.

### Introdução

Segundo a Resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019 [1], é na década de 2021-2030 que os maiores esforços para a redução das emissões de gases com efeito de estufa se devem concentrar, em busca de um futuro neutro em carbono. É nesse contexto que a madeira ressurge como material de construção promissor em alternativa ao betão e ao aço, com o benefício da sua contribuição inata para a redução das emissões mediante sua capacidade de armazenamento de carbono – cerca de 0,9 t CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> material – e menor energia incorporada [2].

De um modo geral, Portugal, ao contrário de muitos países europeus, ainda não se encontra totalmente sensibilizado para o uso da madeira como parte integral da construção de edifícios [3]. A nível nacional, o material é correntemente associado à pequena escala e, quando em maiores proporções, relaciona-se frequentemente a estruturas institucionais. Mesmo para a construção de habitações, a estrutura em madeira assume um carácter meramente excepcional. O modelo de construção em *kits* e sistemas fechados baseados num catálogo finito de soluções, disponibilizados por empresas de fabrico e instalação ou só construção, estabelece-se como o preferencial. Contudo, o estudo desenvolvido por Morgado [4], que caracterizou o mercado da construção em madeira em

Portugal, através da análise da informação disponível aos clientes, concluiu que, apesar da oferta de sistemas construtivos diversos para a habitação, a maior parte deles tem origem na Europa Central, do Norte ou Leste, países de clima mais frio onde a difusão dos edifícios de madeira promoveu a construção do conhecimento e a definição de soluções adequadas para este cenário em específico, mas que não se adequa à realidade portuguesa.

Ainda que a penetração das casas de madeira em Portugal no panorama da construção seja residual, o estudo salienta que as exportações assumem um papel relevante: um quarto da produção nacional de casas de madeira destina-se a exportação [4].

Embora a relação com empresas estrangeiras seja notória (44% das empresas indica que os sistemas são desenvolvidos por parceiros internacionais), é promissor que 56% das empresas adote sistemas construtivos próprios. No entanto, muitos desses sistemas nacionais apresentam anomalias e fragilidades, principalmente no que tange o desempenho térmico e acústico. Apesar de convictas quanto ao perfil inovador dos produtos que oferecem e de manifestarem intenção em melhorá-los continuamente, 40% das empresas demonstraram insegurança quanto à sua aptidão para entrarem no mercado da habitação coletiva [4].

Com o propósito de compatibilizar a construção em madeira em altura ao contexto português, desenvolveu-se um sistema construtivo em painéis pré-fabricados de madeira indicado para a construção de edifícios até 5 pisos e adequado aos padrões e necessidades locais, visando promover a utilização de um recurso que contribua diretamente para alcançar as metas de redução de emissões de gases com efeito de estufa em Portugal, nomeadamente os de carbono, além de preencher as lacunas do conhecimento, determinantes na escassez de utilização da madeira estrutural, diminuindo a disparidade de avanços e incentivos relativamente às tecnologias em betão e aço.

O sistema construtivo foi, então, idealizado baseado nas regras e boas-práticas de conceção para estruturas de madeira identificadas na literatura, considerando os padrões de oferta e consumo do mercado nacional (espécies, produtos e tecnologias de pré-fabricação do sector), as condições e restrições de produção, transporte e construção, bem como os requisitos normativos e legais aplicáveis. Após concebidos, os painéis foram avaliados quanto ao seu desempenho funcional e mecânico em cumprimento aos requisitos regulamentares nacionais. Este trabalho destina-se especificamente à disseminação dos resultados obtidos quanto ao desempenho térmico dos painéis.

## **O sistema construtivo**

O desenvolvimento e aplicação do sistema construtivo, para além da definição do conceito que estipula a sua essência e propósitos, sujeita-se a predefinições que tipificam e especificam os painéis e conferem as condições ideais de projeto para a adequação e o devido cumprimento dos objetivos estruturais e funcionais do sistema. Logo, determina-se que:

- Os painéis de paredes resistentes às cargas verticais são elaborados em estrutura leve de *timber-frame*, com exceção dos painéis de parede do núcleo, que confinam eventuais caixas de escadas e elevadores e que, devido à função de núcleo central, podem ser materializados por painéis CLT ou mistos (CLT + *timber-frame*);
- Os painéis de piso, de maneira a produzir diafragmas resistentes na estrutura, são elaborados com painéis CLT;
- A fundação deve ser executada em betão armado.

Para além das definições estruturais, as camadas funcionais do sistema exercem papel decisivo na garantia do seu adequado desempenho e têm potencial de assegurar, por exemplo, a durabilidade da construção, um dos temas de maior desconfiança no que concerne o uso da madeira em edifícios. Foram, então, identificadas as funções críticas a serem desempenhadas e as camadas funcionais que, direta ou indiretamente, contribuem para este fim (Figura 1). No âmbito deste trabalho, destacam-se as estratégias pertinentes ao desempenho térmico, proteção à água e controle de humidade.

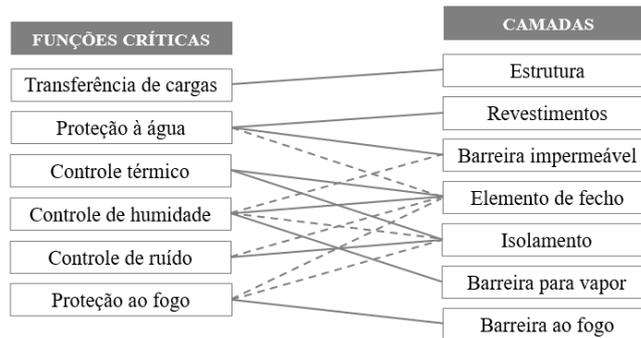


Figura 1: Identificação e correlação entre as funções críticas e as camadas funcionais

Assim, as estratégias de controle térmico adotadas são:

- Para as paredes em *timber-frame*, a capacidade de isolamento é dada pelo preenchimento completo da cavidade com lã de rocha, submetida a uma espessura máxima igual à largura dos montantes. Uma camada extra contínua pelo interior (denominada “camada de serviço”, uma vez que permite, inclusive, a passagem de cabos e tubagens na sua cavidade, evitando que haja interferências nos elementos estruturais) pode ser usada para aumentar o isolamento e evitar as pontes térmicas causadas por interrupções de isolamento devido a montantes e travamentos;
- Para os painéis de cobertura, adota-se a configuração sanduíche, onde a camada isolante é colocada sobre a estrutura;
- Para as paredes de núcleo, é considerada uma camada adicional em XPS entre os seus dois panos estruturais, sejam eles ambos em CLT ou CLT conjugado com *timber-frame*.

As estratégias de proteção à água adotadas são:

- Para as paredes de fachada, utiliza-se revestimento externo em madeira termotratada; membrana respirável, que combina alto grau de resistência à água e humidade e baixa resistência ao vapor; e vão de ventilação entre o revestimento e a estrutura de madeira;
- Para os elementos da cobertura, é considerada uma membrana impermeável.

As estratégias de controle de humidade adotadas são:

- Utilização de barreira para-vapor para controlar a quantidade de vapor de água que passa pelos componentes mais internos devido às diferenças de pressão de vapor interno e externo.

Na Figura 2 são apresentados os painéis desenvolvidos para o sistema construtivo.

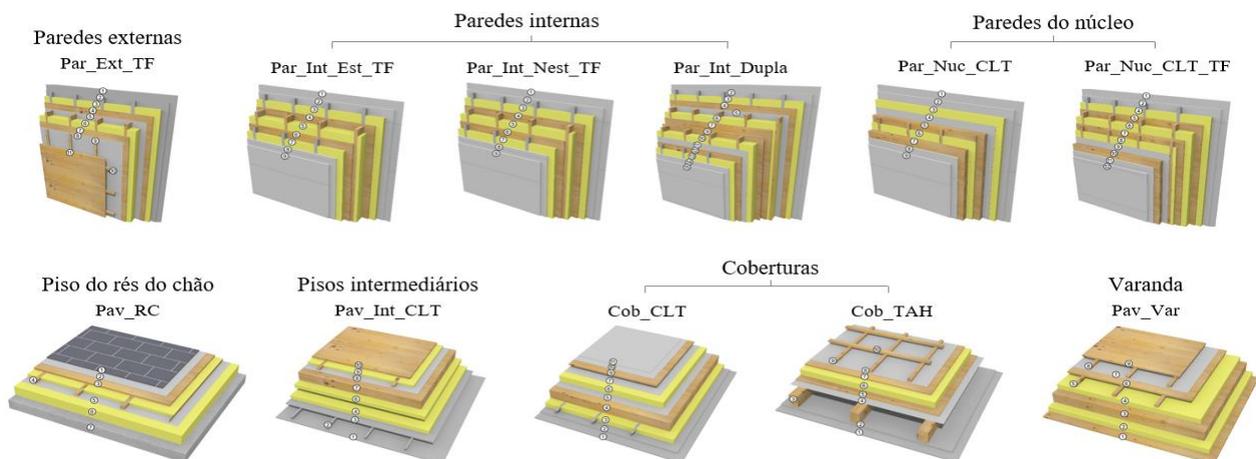


Figura 2: Painéis do sistema construtivo desenvolvido

## Objetivos e estratégias

**Desempenho térmico.** Quando se pretende a melhoria do desempenho térmico dos edifícios, nomeadamente em relação às condições de referência estabelecidas pelo regulamento de desempenho energético português, as estratégias podem ser segmentadas em três metodologias:

- I. Diminuição das necessidades nominais anuais de energia útil para aquecimento ( $N_{ic}$ ) e arrefecimento ( $N_{vc}$ ) a partir das decisões de projeto relativamente às soluções construtivas e arquitetura;
- II. Adoção de sistemas técnicos de climatização e de águas quentes sanitárias (AQS) mais eficientes;
- III. Aumento do contributo de energias de fontes renováveis ( $E_{ren}$ ), reduzindo, assim, as necessidades globais nominais de energia primária ( $N_{ic}$ ) dos edifícios.

Apesar da simplicidade e eficácia inerentes à execução das abordagens II e III, estas não devem ser desassociadas da abordagem I, pelo que a combinação das três produz resultados verdadeiramente benéficos em termos térmicos e não somente energéticos. Isso implica na necessidade de evolução dos sistemas construtivos na mesma proporção que os sistemas técnicos e alternativas renováveis. Por isso, o desenvolvimento do sistema construtivo ocupou-se essencialmente da abordagem I, que objetiva a diminuição das necessidades de aquecimento e arrefecimento a partir de parâmetros que as influenciam. As necessidades de aquecimento aumentam conforme a perda de calor por transmissão e ventilação e diminuem segundo os ganhos térmicos úteis, sejam eles solares ou internos. Já as necessidades de arrefecimento dependem essencialmente dos ganhos térmicos brutos minorados pelo fator de utilização dos ganhos térmicos, determinado pelas condições de transferência de calor por transmissão e ventilação.

Todas estas medidas devem ser consideradas na elaboração dos projetos de edifícios, mas apenas algumas delas têm lugar na elaboração de um sistema construtivo desassociado de uma arquitetura definida. Sendo assim, apenas as medidas relacionadas exclusivamente à qualidade e desempenho dos elementos opacos serão consideradas e implementadas, sendo as medidas arquitetónicas e aquelas relacionadas aos elementos envidraçados, sistemas técnicos, inércia térmica e certificação energética responsabilidade dos projetistas.

**Controle de humidade.** De maneira a evitar a troca de humidade no interior dos elementos construtivos, prejudiciais à durabilidade da madeira e, conseqüentemente, à vida útil do edifício e à qualidade do ambiente interior, são identificadas duas abordagens que devem ser implementadas de forma conjugada.

A primeira consiste na minimização da entrada de humidade nos elementos construtivos e seus componentes. A segunda abordagem consiste em garantir a secagem rápida e completa do material em caso de absorção excessiva de humidade.

### **Previsão do desempenho térmico de controle de humidade**

O Sistema de Certificação Energética dos Edifícios de Habitação (SCE), Decreto-Lei n.º 101-D/2020 [5], estabelece os requisitos, parâmetros e metodologias de caracterização do desempenho energético de edifícios de habitação, objetivando, sobretudo, a melhoria do comportamento térmico, a eficiência dos sistemas técnicos e a minimização do risco de ocorrência de condensações superficiais na envolvente.

No âmbito do SCE e tratando-se dos elementos opacos do sistema construtivo desenvolvidos neste estudo, estes devem apresentar coeficientes de transmissão térmica ( $U$ ) inferiores aos máximos admissíveis ( $U_{máx}$ ) definidos na Portaria n.º 138-I/2021 [6], em prol da qualidade térmica da envolvente. Também são definidos os valores de referência ( $U_{ref}$ ).

A aferição do coeficiente de transmissão térmica dos painéis propostos para os elementos opacos da envolvente dos edifícios foi realizada usando o programa Ubakus [7] aplicando o método descrito pela EN ISO 6946:2017 [8]. As condutibilidades térmicas dos diversos materiais aplicados foram obtidas a partir das respetivas fichas técnicas e as resistências térmicas superficiais foram retiradas da EN ISO 6946:2017 [8].

Desassociado de uma arquitetura e localização exatos, convém, ainda, que o sistema atenda aos requisitos mais exigentes do SCE, tanto em termos de clima quanto da tipologia das envoltentes. Devido à elevada capacidade térmica da madeira e à esbeltez dos elementos dos variados sistemas estruturais em madeira, que garantem a ausência ou reduzida contribuição de zonas de ponte térmica plana, dispensa-se a determinação rigorosa das áreas e dos coeficientes de transmissão térmica das zonas de montantes, vigas e outras heterogeneidades, podendo ser considerado para estes elementos o coeficiente de transmissão térmica da zona corrente da envolvente.

Para os elementos da envolvente exterior, nomeadamente paredes de fachada e coberturas, que necessariamente atuam na proteção do espaço interior contra as variações e intempéries do exterior, é analisado também o comportamento quanto à capacidade térmica e proteção contra a humidade.

Em termos da proteção térmica, são analisados a capacidade de armazenamento de calor do elemento, bem como sua contribuição para a atenuação da amplitude térmica e o atraso térmico no ambiente interior em função da temperatura exterior. A partir destes parâmetros, são traçados o gráfico da temperatura superficial interior e exterior ao longo do dia e um perfil de temperatura na seção transversal do elemento onde é simulada a atenuação da temperatura para seis horários distintos do dia: 3h, 7h, 11h, 15h, 19h e 23h.

Apesar da proteção térmica de um fogo ser influenciada por diversos fatores, nomeadamente a radiação solar direta através das janelas e da capacidade total de armazenamento de calor (incluindo pavimentos e paredes interiores), convém avaliar o potencial dos painéis contidos na envolvente exterior na contribuição para a proteção térmica do ambiente interior.

Em seguida, são simuladas condições climáticas específicas em conformidade com a norma DIN 4108-3 [9] e que são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1: Condições climáticas em conformidade com a norma DIN 4108-3 [9]

	Temperatura [°C]	Humidade [%]
Interior	20	50
Exterior	-5	80

Considerando as resistências térmicas superficiais especificadas na DIN 4108-3 [9] (por representarem o pior caso para a proteção contra humidade), são calculadas as temperaturas mínima, média e máxima nas superfícies interna e externa considerando resistências de contato térmico específicas para proteção contra humidade e perfil de temperatura, de acordo com a mesma referência normativa.

Elabora-se, também, o perfil de humidade no interior do elemento usando o método de elementos finitos 2D do Ubakus [7] que, em contraste com a norma DIN 4108-3 [9], considera também camadas descontínuas de madeira e barreiras para-vapor com humidade variável. A partir da temperatura mínima da superfície interior, o programa estipula a humidade relativa associada a ela e determina o potencial para formação de bolores.

Para a verificação quanto à ocorrência de condensações no interior dos elementos, é imposta uma exposição de 90 dias às referidas condições climáticas de inverno constante e, a partir delas, das prescrições da DIN 4108-3 [9] e das propriedades dos materiais utilizados (transmissão do vapor de água e condutividade térmica), determinam-se as condições de contorno, tanto para o inverno como para o verão. Assim, calcula-se o potencial de evaporação para a reserva de secagem no período de chuva no plano com o potencial de evaporação mais baixo, a quantidade de água de condensação, a máxima massa de evaporação possível para a reserva de secagem no plano com o menor potencial de evaporação no inverno e a reserva de secagem do elemento, a depender se há ou não água de condensação, e compara-se este valor com o mínimo requerido disposto na DIN 68800-2 [10]. Caso a verificação seja positiva, o elemento analisado estará livre de condensação.

## Resultados

A simulação do desempenho térmico produzida no programa Ubakus [7] resultou nos coeficientes de transmissão térmica ( $U$ ) apresentados na Tabela 2 para cada um dos elementos do sistema construtivo.

A Tabela 2 apresenta os valores máximos e de referência que cada elemento deve cumprir segundo a Portaria n.º 138-I/2021 [6]. Para precisar estes valores, foi considerado o pior caso, supondo as condições de clima e arquitetura que exigem o máximo desempenho previsto no SCE em termos de qualidade térmica dos elementos opacos. Logo, assumiu-se para os valores de  $U_{\text{máx}}$  e  $U_{\text{ref}}$  os relativos à zona climática I3 e, para elementos de paredes e pavimentos interiores com potencial para separação entre espaços úteis (EU) de espaços não úteis (ENU) com  $B_{\text{ztu}} > 0,7$ , ou seja, que possam configurar envolventes interiores com requisito de exterior, considerou-se, por

defeito,  $B_{ztu}$  igual a 0,8 para todos os eventuais ENU, impondo-se os requisitos particulares a esta circunstância.

Tabela 2: Verificação do coeficiente de transmissão térmica dos elementos construtivos - zona climática I3

Elemento	Tipo de envolvente	Zona climática I3		$U_{Ubakus}$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	Verificação $B_{ztu} > 0,7$
		$U_{ref}$ [W/m <sup>2</sup> .°C] $B_{ztu} > 0,7 - B_{ztu} \leq 0,7$	$U_{m\acute{a}x}$ [W/m <sup>2</sup> .°C] $B_{ztu} > 0,7 - B_{ztu} \leq 0,7$		
Par_Ext_TF	Exterior	0,35	0,35	0,22	OK
Sem cam. serviço				0,28	OK
Par_Int_Est_TF	Interior	0,35 – 0,60	0,35 – 1,90	0,19	OK
Sem cam. serviço				0,27	OK
Par_Int_Nest_TF	Interior	0,35 – 0,60	0,35 – 1,90	0,24	OK
Sem cam. serviço				0,37	KO
Par_Int_Dupla_TF	Interior	0,35 – 0,60	0,35 – 1,90	0,11	OK
Sem cam. serviço				0,14	OK
Par_Nuc_CLT	Interior	0,35 – 0,60	0,35 – 1,90	0,27	OK
Sem cam. serviço				0,44	KO
Par_Nuc_CLT_TF	Interior	0,35 – 0,60	0,35 – 1,90	0,21	OK
Sem cam. serviço				0,25	OK
Pav_RC	Sem requisitos	–	–	0,26	–
Pav_Int_CLT	Interior	0,30 – 0,50	0,30 – 1,20	0,20	OK
Sem teto acústico				0,31	KO
Cob_CLT	Exterior	0,30	0,30	0,22	OK
Cob_TAH	Exterior	0,30	0,30	0,26	OK
Var_CLT	–	–	–	0,21	–

Importa referir que todas as previsões do coeficiente de transmissão térmica dos elementos cuja configuração estrutural contém um ou mais painéis CLT baseou-se em dimensões estimadas para a espessura dos mesmos (72 mm para paredes e 120 mm para pavimentos e cobertura) segundo as cargas habituais verificadas em edifícios de até 5 pisos, pelo que convém proceder novamente à análise térmica destes elementos caso a espessura aplicada seja inferior àquela utilizada nas simulações deste estudo. Ainda, para todos os espaçamentos entre montantes ou ripas, assumiu-se a distância mínima de 300 mm, uma vez que este configura o pior caso no que concerne as interrupções das camadas de isolamento contidas no interior dos elementos construtivos avaliados.

A Tabela 3 analisa os elementos que não respeitam os requisitos impostos à zona climática I3 para localizações com condições menos exigentes pertinentes às zonas climáticas I1 e I2.

Tabela 3: Verificação do coeficiente de transmissão térmica dos elementos construtivos com desempenho insuficiente para a zona climática I3, nas zonas climáticas I1 e I2

Elemento	$U_{Ubakus}$ [W/m <sup>2</sup> .°C]	$U_{m\acute{a}x}$ [W/m <sup>2</sup> .°C] $B_{ztu} > 0,7 - B_{ztu} \leq 0,7$		Verificação $B_{ztu} > 0,7$	
		Z.C. I1	Z.C. I2	Z.C. I1	Z.C. I2
Par_Int_Nest_TF Sem cam. serviço	0,374	0,50 – 2,00	0,40 – 2,00	OK	OK
Par_Nuc_CLT Sem cam. serviço	0,436	0,50 – 2,00	0,40 – 2,00	OK	KO
Pav_Int_CLT Sem teto acústico	0,314	0,40 – 1,65	0,35 – 1,30	OK	OK

Os dados de *input* e *output* do programa para cada um dos elementos analisados estão disponíveis em Tenório [11].

Para os painéis de parede de fachada (Par\_Ext\_TF), obteve-se um coeficiente de transmissão térmica inferior ao máximo estipulado. Quando simulada esta configuração de parede dispensando-se a aplicação da camada de serviço que, além de prover o vão para a passagens das instalações, forma uma faixa extra e contínua de material isolante pelo interior, atinge-se um coeficiente de transmissão térmica mais elevado, mas ainda em cumprimento ao requisito térmico imposto a este elemento. Quando a parede de fachada estiver justaposta à parede de fachada do edifício vizinho, nenhum requisito térmico é imposto, uma vez que se pressupõe que o fogo

adjacente é um EU aquecido ou arrefecido de maneira a manter a temperatura interior de referência de conforto térmico.

A variedade de paredes interiores pode eventualmente fazer a divisão entre EU e ENU, compondo uma envolvente interior com requisitos de interior ( $B_{zti} \leq 0,7$ ) ou exterior ( $B_{zti} > 0,7$ ). No primeiro caso, todos os elementos analisados cumpriram largamente aos limites regulamentares, sejam eles referentes à zona climática I1, I2 ou I3. No segundo caso, apesar de mais rigoroso, específico e, possivelmente, menos frequente, as paredes internas estruturais (Par\_Int\_Est\_TF) com ou sem ambas camadas de serviço ainda apresentam bom desempenho. Já as paredes interiores não-estruturais (Par\_Int\_Nest\_TF), por apresentarem menor espessura e, conseqüentemente, menos material de isolamento térmico na sua cavidade, não cumprem os requisitos quando ambas camadas de serviço são dispensadas. Assim, nos casos em que esta configuração de parede seja aplicada numa envolvente interior com requisitos de exterior na zona climática I3, esta necessariamente deve apresentar camada de serviço em pelo menos uma das suas faces, com coeficiente de transmissão térmica de  $0,28 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ . Para as zonas climáticas I1 e I2, ambas configurações são satisfatórias, conforme mostra a Tabela 3.

O mesmo ocorre para as paredes de núcleo que, por confinarem caixas de escadas e de elevadores, têm maior potencial para comporem uma envolvente interior com requisitos de exterior a depender das condições de ventilação, volume e área em contato com EU do ENU confinado. A solução Par\_Nuc\_CLT\_TF tem comportamento satisfatório em ambas configurações simuladas (com ou sem camada de serviço) devido ao preenchimento total da cavidade do *timber-frame* com material isolante. Já a solução Par\_Nuc\_CLT não teve desempenho suficiente quando retirada a camada de serviço, pelo que esta é obrigatória em circunstâncias de aplicação da solução em CLT duplo (Par\_Nuc\_CLT) em envolventes interiores com requisitos de exterior na zona climática I3 e também na zona climática I2, como apresentado na Tabela 3. Caso se opte pela exposição do CLT como acabamento estético das paredes confinantes das caixas de escadas, o coeficiente de transmissão térmica aumenta cerca de  $0,005 \sim 0,021 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , valor irrisório e insuficiente para refutar a aprovação destas configurações de painéis nos casos referidos.

As paredes internas duplas (Par\_Int\_Dupla\_TF), por apresentarem, pelo menos, duas cavidades completamente preenchidas por material isolante, apresentaram coeficientes de transmissão térmica bastante inferiores, mesmo quando dispensadas as camadas de serviço. Esta configuração robusta de parede interna foi desenvolvida visando a promoção do conforto acústico entre frações adjacentes e, nestas condições de aplicação, não existem requisitos térmicos, uma vez que ambos espaços adjacentes são considerados úteis. Contudo, a análise térmica foi igualmente efetuada supondo a eventual aplicação desta configuração em circunstâncias diversas que requeiram elevado desempenho acústico, como a separação entre frações e áreas comuns dos edifícios com elevada produção de ruído e características de ENU.

A solução construtiva para o rés-do-chão (Pav\_RC) também dispensa requisitos, uma vez que está invariavelmente em contato com o solo. O elemento de varanda (Var\_CLT) também não apresenta requisitos, pois não se enquadra como envolvente. Apesar disso, a análise do coeficiente de transmissão térmica do elemento de varanda torna-se interessante, uma vez que este é envolto em material isolante com o objetivo de mitigar as pontes térmicas do encontro entre fachada e elementos de piso. Verifica, portanto, que o coeficiente de transmissão térmica dos elementos de varanda ( $0,21 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ), de piso intermediário ( $0,20 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ) e de parede de fachada ( $0,22 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ) são compatíveis. Ainda, para o caso extremo em que uma varanda seja fechada e seu ambiente se configure como um EU, verifica-se que o elemento apresentaria comportamento satisfatório enquanto componente da envolvente exterior.

Tratando-se dos pisos intermédios (Pav\_Int\_CLT), o elemento de painel proposto atende aos requisitos mais rigorosos quando contido em uma envolvente interior com requisito de exterior na zona climática I3. No entanto, uma vez que o teto falso acústico e suas camadas internas de material isolante são excluídos, restando apenas uma camada de 60 mm de lã de rocha sob o CLT, a configuração passa a atender apenas aos critérios das zonas climáticas I1 e I2. Para que a solução sem teto falso acústico seja satisfatoriamente aplicada para este propósito sob as condições da zona

climática I3, é necessário que a camada de lã de rocha entre o CLT e as placas de gesso cartonado tenha, pelo menos, cerca de 82 mm (considerando as mesmas propriedades do material). Utilizando-se uma camada de 90 mm (a primeira espessura superior a 60 mm disponível do produto inicialmente escolhido – *Comfort, Volcalis*), verifica-se um coeficiente de transmissão térmica total do elemento de  $0,29 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ .

Ambas as opções de cobertura respeitam os requisitos impostos às zona climáticas I1 a I3 e, caso se opte por utilizar o CLT para o acabamento do teto, a solução *Cob\_CLT* passa a apresentar um coeficiente de transmissão térmica igual a  $0,29 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ , valor ligeiramente inferior ao limite máximo.

Além da análise apresentada acima, os elementos de painéis necessariamente contidos nas envolventes exteriores dos edifícios (soluções de cobertura e fachada) foram analisados de maneira mais aprofundada quanto ao seu comportamento frente as variações de temperatura e humidade. No entanto, importa referir que, apesar de completa, a análise do *software* em matéria da proteção a humidade só é possível quando se impõe as condições de clima e metodologias de cálculo definidas pela DIN 4108-3 [9], uma norma alemã que não reflete as condições climáticas observadas no contexto português. A seguir, são apresentados os resultados obtidos para os painéis de parede de fachada.

Segundo o programa, a parede de fachada (*Par\_Ext\_TF*) oferece capacidade de armazenamento de calor de  $76 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$ , considerando todos os componentes do elemento, e  $42 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$ , considerando apenas as camadas internas. A amplitude térmica é, então, atenuada em 18 vezes, ou seja, a temperatura no exterior varia 18 vezes mais do que a temperatura no interior, com um atraso térmico de 10,5 horas, que é o tempo após o qual o pico de temperatura do exterior atinge o interior. A Figura 3a mostra o gráfico da amplitude térmica no exterior (a vermelho) e no interior (a azul) ao longo de um dia, onde se nota que o máximo da temperatura da superfície interna ocorre durante a segunda metade da noite, o que é desejável, uma vez que a temperatura exterior será mais baixa.

Apesar de não haver diferenças significativas entre a capacidade de armazenamento de calor da configuração original e da configuração em que se dispensa a camada de serviço (de  $76 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$  para  $73 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$ ), ao simular a segunda, a amplitude térmica passa a ser atenuada em apenas 11,4 horas, com a mudança de fase ocorrendo num período de 7,7 horas.

O perfil apresentado na Figura 3b apresenta a simulação da atenuação da temperatura promovida pela configuração original dos painéis de fachada para seis horários distintos do dia: três diurnos (7h, 11h, 15h; a castanho) e três noturnos (19h, 23h, 3h; a vermelho).

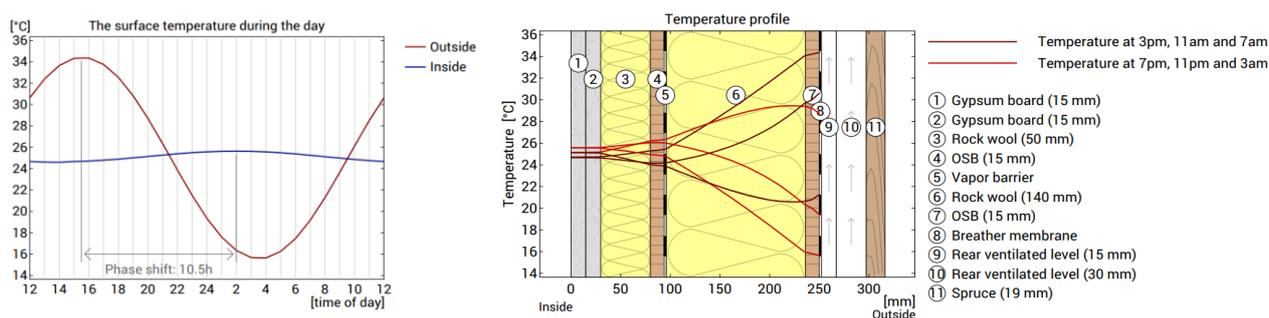


Figura 3: (a) Atenuação da amplitude térmica assegurada pela *Par\_Ext\_TF* (a azul) com relação à temperatura exterior (a vermelho); (b) Atenuação térmica através das camadas da *Par\_Ext\_TF* para seis horários distintos do dia: três diurnos (7h, 11h, 15h; a castanho) e três noturnos (19h, 23h, 3h; a vermelho)

Importa referir que a avaliação da proteção térmica é independente de *inputs* específicos acerca da temperatura exterior, pelo que os resultados obtidos para a atenuação da amplitude térmica e atraso térmico objetivam simplesmente identificar o potencial do elemento construtivo e não têm o propósito de fornecer qualquer informação sobre a temperatura interna esperada.

Em seguida, foram impostas condições de clima específicas segundo as prescrições da DIN 4108-3 [9] (interior:  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  e 50% de humidade; exterior:  $-5 \text{ }^\circ\text{C}$  e 80% de humidade) para a verificação do desempenho do elemento quanto à proteção à humidade.

Numa análise referente à temperatura da superfície interna da parede, os painéis de parede de fachada na sua configuração original apresentaram temperaturas mínimas na superfície exterior e interior de  $-4,8\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $17,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ , respetivamente.

A já referida temperatura da superfície interna ( $17,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) implica uma humidade relativa de 57% na superfície, condições sob as quais não é esperada a formação de bolores. A Figura 4 apresenta o perfil de humidade relativa através dos componentes do elemento (a preto) e o ponto de saturação (a azul) num corte transversal.

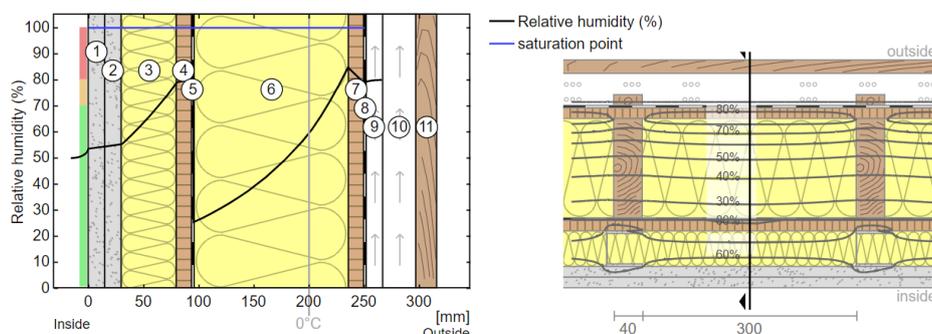


Figura 4: Perfil de humidade no interior da Par\_Ext\_TF para as condições climáticas dispostas na DIN 4108-3 [9]

Ao expor o elemento às referidas condições climáticas por 90 dias, verificou-se que o elemento tem potencial para se manter livre de condensações, uma vez que a sua reserva de secagem, segundo os métodos de cálculo da DIN 4108-3 [9], é igual a  $110\text{ g/m}^2\cdot\text{a}$  (superior ao mínimo requerido de  $100\text{ g/m}^2\cdot\text{a}$  para paredes e tetos). Isto deve-se à transmissão do vapor de água (Sd) atingida pelo elemento (total:  $162,41\text{ m}$ ; até o plano com a menor capacidade de evaporação no período do inverno, ou seja, entre a lã de rocha e o OSB:  $154,06\text{ m}$ ), principalmente devido à membrana para-vapor escolhida ( $S_d = 150\text{ m}$ ), garantindo um potencial de evaporação no inverno de  $0,012\text{ kg/m}^2$  e massa de evaporação máxima no verão de  $0,10\text{ kg/m}^2$ . Os diagramas de difusão no período do inverno e do verão apresentados na Figura 5 mostram a pressão de vapor (a preto) e o ponto de saturação (a azul) no interior do elemento.

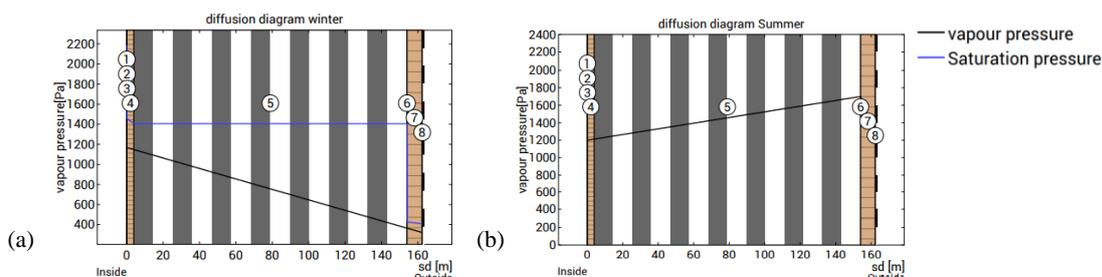


Figura 5: Diagramas de difusão no plano com a menor capacidade de evaporação da Par\_Ext\_TF. (a) Inverno; (b) Verão

Os painéis de cobertura, Cob\_CLT e Cob\_TAH, apresentaram os resultados para a capacidade de armazenamento de calor total e das camadas internas, atenuação da amplitude térmica e atraso térmico apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Resultados obtidos para os parâmetros térmicos da Cob\_CLT e Cob\_TAH

Parâmetro	Elemento	
	Cob_CLT	Cob_TAH
Capacidade de armazenamento de calor [ $\text{kJ/m}^2\cdot\text{K}$ ]	Total	119
	Camadas internas	78
Atenuação da amplitude térmica	71,4	2,7
Mudança de fase [h]	14,3	6,0

Na Figura 6 apresentam-se os gráficos da amplitude térmica no exterior (a vermelho) e no interior (a azul) ao longo de um dia para ambas soluções, onde se pode observar com clareza a diferença significativa na contribuição de cada uma delas no atraso térmico do ambiente interior, e

os perfis com a simulação da atenuação da temperatura para seis horários distintos do dia (Figura 7): três diurnos (7h, 11h, 15h; a castanho) e três noturnos (19h, 23h, 3h; a vermelho).

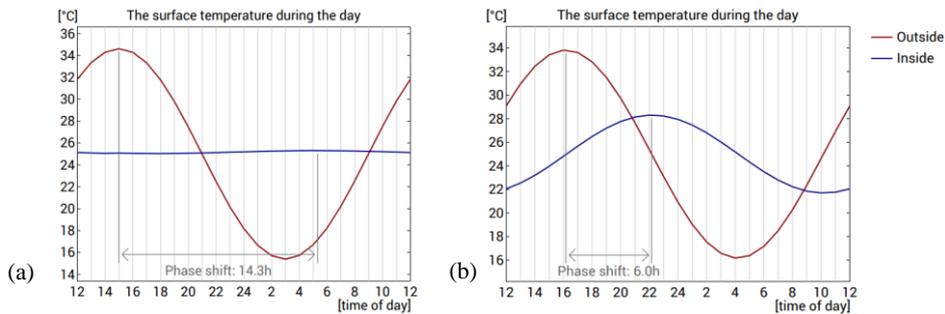


Figura 6: Atenuação da amplitude térmica assegurada pela (a) Cob\_CLT e pela (b) Cob\_TAH (a azul) com relação à temperatura exterior (a vermelho)

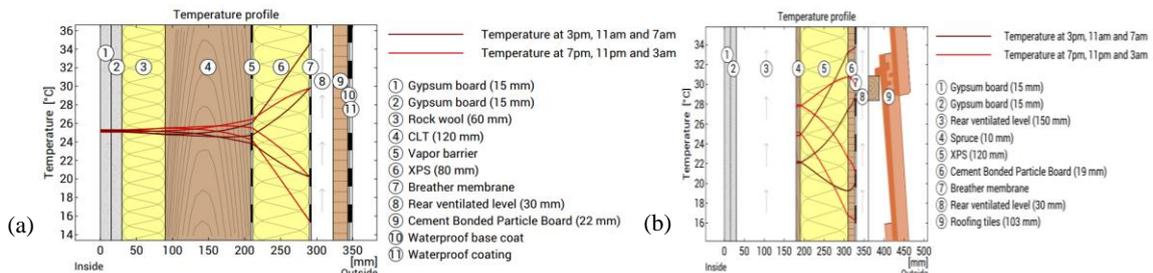


Figura 7: Atenuação térmica através das camadas da (a) Cob\_CLT e da (b) Cob\_TAH, para seis horários distintos do dia: três diurnos (7h, 11h, 15h; a castanho) e três noturnos (19h, 23h, 3h; a vermelho)

Simulando as mesmas condições climáticas impostas ao painel de fachada, obteve-se para os painéis de cobertura Cob\_CLT e Cob\_TAH a temperatura mínima na superfície interior de 18,0 °C e 18,4 °C, respetivamente, não havendo diferença significativa entre as temperaturas mínimas na superfície exterior dos elementos de cobertura (-4,8 °C e -4,7 °C).

Para as referidas temperaturas mínimas na superfície interior, os painéis Cob\_CLT e Cob\_TAH apresentam humidade relativa na superfície de 57% e 55%, condições sob as quais não é esperada a formação de bolores. A Figura 8 apresenta o perfil de humidade relativa através dos componentes do elemento (a preto) e o ponto de saturação (a azul) em cortes transversais.

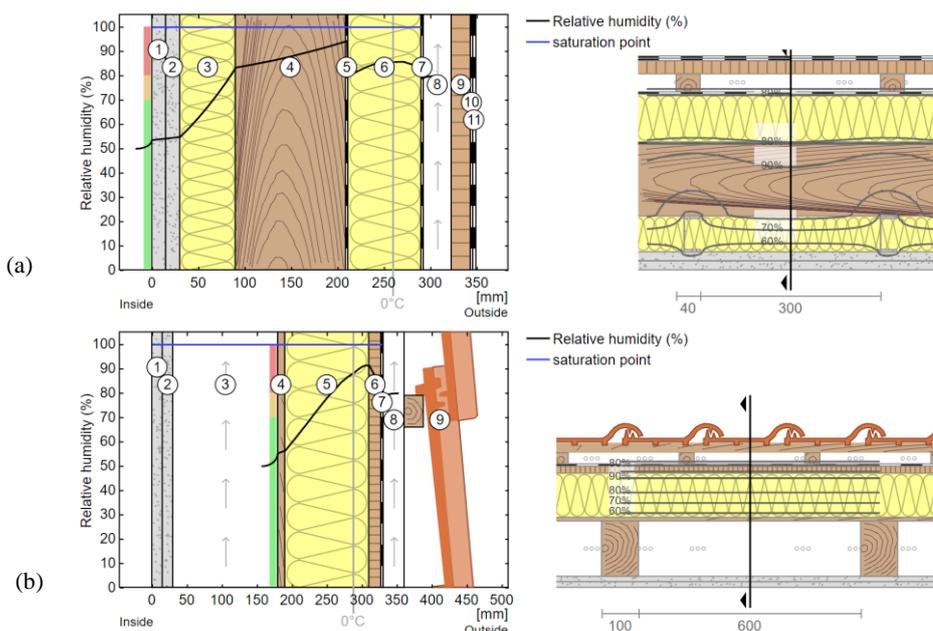


Figura 8: Perfil de humidade no interior da (a) Cob\_CLT e da (b) Cob\_TAH para as condições climáticas definidas na DIN 4108-3 [9]

Na Tabela 5, são apresentados os valores considerados e obtidos no desenvolvimento da análise referente à reserva de secagem dos elementos de cobertura.

Tabela 5: Resultados obtidos para os parâmetros de humidade da Cob\_CLT e Cob\_TAH

Parâmetro	Elemento	
	Cob_CLT	Cob_TAH
Plano com a menor capacidade de evaporação no período do inverno	Entre CLT e barreira para-vapor	No XPS
Sd [m]	Barreira para-vapor	2,5
	Total	13,88
	No plano	3,18
Potencial de evaporação no inverno [kg/m <sup>2</sup> ]	–	0,039
Condensação [kg/m <sup>2</sup> ]	0,020	–
Massa de evaporação máxima no verão [kg/m <sup>2</sup> ]	0,508	0,62
Reserva de secagem atingida [g/m <sup>2</sup> .a]	487	655
Reserva de secagem mínima requerida [g/m <sup>2</sup> .a]	250	

O elemento Cob\_TAH tem potencial para se manter livre de condensações, uma vez que a sua reserva de secagem é superior ao mínimo requerido para coberturas, segundo a DIN 68800-2 [10]. Já o elemento Cob\_CLT apresentou condensação subtil no plano com menor capacidade de evaporação no período do inverno (entre o CLT e a barreira para-vapor), de 0,020 kg/m<sup>2</sup>. No entanto, esta quantidade de água de condensação está abaixo do máximo tolerado (0,5 kg/m<sup>2</sup>) e está completamente seca no verão, uma vez que a massa de evaporação máxima é significativamente superior. Todavia, o método de cálculo usado não tem em consideração a condutividade capilar dos materiais, fenómeno que favorece a secagem da condensação devido ao espalhamento do volume de água. Assumindo que a água de condensação é totalmente aplicada à camada em CLT, verifica-se um aumento no teor de humidade associado à massa da madeira de 0,036%, valor irrisório comparado com a tolerância usualmente praticada, de 5%. Além disso, o programa impõe condições de clima mais rigorosas do que aquelas comuns no território português.

Os diagramas de difusão no período do inverno e do verão, apresentados nas Figuras 9 e 10, mostram a pressão de vapor (a preto) e o ponto de saturação (a azul) no interior dos elementos.

Convém que as análises referentes à proteção contra a humidade sejam abordadas em estudos futuros aplicando-se metodologias de cálculo portuguesas e parametrizando-se as condições climáticas para a realidade do território nacional.

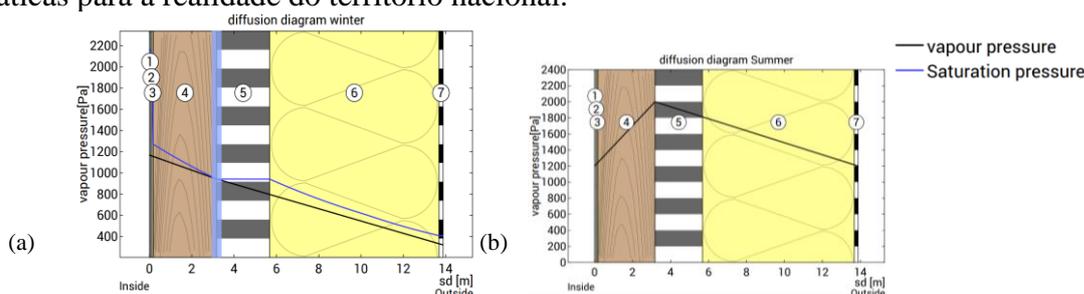


Figura 9: Diagramas de difusão no plano com a menor capacidade de evaporação (Cob\_CLT). (a) Inverno; (b) Verão

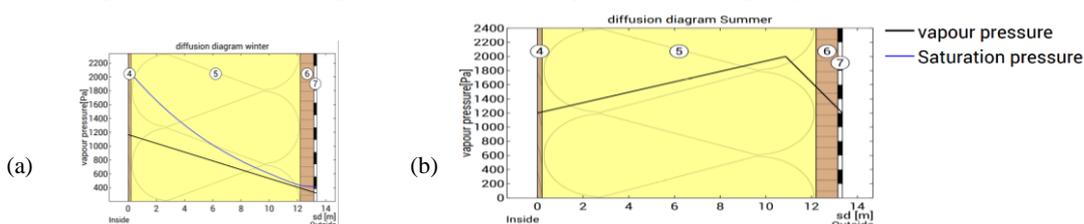


Figura 10: Diagramas de difusão no plano com a menor capacidade de evaporação (Cob\_TAH). (a) Inverno; (b) Verão

## CONCLUSÃO

Segundo as análises realizadas no âmbito do desempenho funcional dos painéis do sistema construtivo, estes apresentaram resultados bastante favoráveis em termos térmicos (Tabelas 2 e 3),

sendo aprovados em todas as suas configurações originais e na maioria das variações supostas para a utilização na zona climática mais rigorosa do território português (I3), considerando as condições mais desfavoráveis para cada tipo de elemento construtivo. Os painéis que constituem os elementos construtivos expostos à humidade também apresentaram bom comportamento higroscópico e potencial para se manterem livres de condensações. Isso não descarta, no entanto, que o projeto térmico seja desenvolvido para cada projeto em utilização do sistema construtivo, uma vez que os aspetos arquitetónicos e os elementos envidraçados não foram considerados da análise realizada. Assim, questões como a presença e interferência de pontes térmicas, a inércia térmica e o desempenho energético do edifício a depender das condições de ventilação, exposição solar e sistemas técnicos devem ser avaliadas caso a caso.

## REFERÊNCIAS

- [1] Resolução do Conselho de Ministros n.º 107/2019. RNC 2050: *Roteiro para a Neutralidade Carbónica 2050: Estratégia de Longo Prazo para a Neutralidade Carbónica da Economia Portuguesa em 2050*. Diário da República, 1ª série, n.º 123, 1 de julho de 2019.
- [2] Tackle Climate Change: *Use Wood* (The European Confederation of Woodworking Industries (CEI-Bois), Bruxelas 2008).
- [3] J. M. Branco, *Casas de madeira: Da tradição aos novos desafios*. Em: P. B. Lourenço; J. M. Branco; H. Cruz; L. Nunes, *Casas de madeira*, livro de atas do Seminário Casas de Madeira, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa (2013).
- [4] L. Morgado, *A oferta da habitação em madeira em Portugal: A procura de uma alternativa no âmbito da arquitectura*, livro de resumos do 1º Congresso Ibero-Latino Americano de Madeira na Construção, Departamento de Engenharia Civil da FCTUC, Coimbra, Portugal (2011).
- [5] Sistema de Certificação Energética dos Edifícios de Habitação (SCE), Decreto-Lei n.º 101-D/2020, Diário da República n.º 237/2020, 1º Suplemento, Série I de 2020-12-07
- [6] Portaria n.º 138-I/2021. Diário da República, 1ª série, n.º 126, 2º suplemento, 1 de julho de 2021, pág. 128-(12) - 128-(53).
- [7] R. Plag: *Ubakus* (Ralf Plag, Alemanha, 2009). Disponível em: [ubakus.de](http://ubakus.de).
- [8] EN ISO 6946. Building components and building elements — Thermal resistance and thermal transmittance — Calculation methods. Bruxelas, Bélgica, European Committee for Standardization CEN, 2017.
- [9] DIN 4108-3. Thermal protection and energy economy in buildings - Part 3: Protection against moisture subject to climate conditions - Requirements, calculation methods and directions for planning and construction. Deutsches Institut Fur Normung E.V. (German National Standard), 2018
- [10] DIN 68800-2. Wood preservation - Part 2: Preventive constructional measures in buildings. Deutsches Institut Fur Normung E.V. (German National Standard), 2012
- [11] M. Tenório, *Sistema construtivo em painéis modulares para edifícios coletivos com estrutura de madeira*, Dissertação de 2º ciclo, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal (2019).

## Investigação quanto a avaliação da resistência ao esmagamento da madeira em ligações do tipo cavilha

AQUINO Caroline D.<sup>1,a</sup>, RODRIGUES Leonardo G.<sup>2,b</sup> e BRANCO Jorge M.<sup>1,c</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil – ISISE, Universidade do Minho, Guimarães, 4800-058, Portugal

<sup>2</sup>Coates Building, University Park, Nottingham, NG7 2RD, UK

<sup>a</sup>carolinedapieve@gmail.com, <sup>b</sup>Leonardo.Rodrigues@nottingham.ac.uk, <sup>c</sup>jbranco@civil.uminho.pt

**Palavras-chave:** Estruturas de Madeira, Resistência ao Esmagamento, Fiabilidade.

**Resumo.** O Eurocódigo 5 propõe um modelo para a determinação da resistência ao esmagamento localizado da madeira para ligações do tipo cavilha, considerando o diâmetro da cavilha e a densidade da madeira. No entanto, por ser uma expressão generalizada, falha em prever, de forma fiável, a resistência ao esmagamento localizado para algumas espécies de madeira. Com base em vários trabalhos experimentais, este trabalho procura avaliar o modelo normativo para a espécie *Pinus sylvestris*, e propor uma equação alternativa que melhor se ajuste aos resultados experimentais através de um modelo de regressão linear onde os parâmetros e sua variabilidade são obtidos pelo método dos mínimos quadrados. Através de análise estatística, tomando a densidade como variável aleatória e gerando novas amostras através do método de Monte Carlo, concluiu-se que a equação normativa sobrestima o valor da resistência ao esmagamento localizado, enquanto a equação inferida se aproxima aos resultados experimentais. Finalmente, o impacto da adoção da equação normativa é avaliado em termos de uma análise de fiabilidade. Foi analisada a fiabilidade do projeto de ligações de madeira do tipo cavilha de acordo com as diretrizes do Eurocódigo 5. Os resultados obtidos apresentaram uma diferença no índice de fiabilidade entre os modelos de 15%, onde o modelo normativo apresentou menor probabilidade de falha. No entanto, essa estimativa indica que a utilização da equação normativa para a resistência ao esmagamento localizado leva a uma falsa medida de segurança, uma vez que não é um modelo fiável comparativamente aos resultados experimentais.

### Introdução

A aplicação de métodos de fiabilidade estrutural tem levado a uma avaliação cada vez mais realista da segurança estrutural. Alguns esforços nessa direção foram empreendidos para a madeira, entretanto, os desenvolvimentos são menos significativos do que para outros materiais estruturais, como o aço e o betão [1]. Este trabalho visa contribuir para o desenvolvimento da avaliação da fiabilidade de sistemas estruturais de madeira através de métodos probabilísticos que têm vindo a ser proposto para o projecto estruturas de madeira devido à grande variabilidade de suas propriedades físicas e mecânicas [2].

No que diz respeito ao dimensionamento, a segurança em estruturas de madeira é usualmente muito dependente da eficiência de suas ligações. Estudos sugerem que estas podem limitar a capacidade estrutural global, a capacidade de serviço e a segurança em situação de incêndio [3]. Além disso, avaliações feitas a estruturas de madeira danificadas após eventos extremos apontaram para ineficiências nas ligações como a causa primária dos danos [4]. Assim, torna-se evidente a importância de estudar o comportamento de ligações de madeira em prol de um dimensionamento estrutural seguro.

Ligações do tipo cavilha metálica são as mais comuns em estruturas de madeira. Do ponto de vista de projeto, uma das variáveis que mais influenciam a capacidade de carga destas ligações é a

resistência ao esmagamento da madeira. Dessa forma, este trabalho propõe-se a investigar, através de métodos estatísticos e probabilísticos, as incertezas relacionadas com esse parâmetro. A investigação é conduzida a partir de resultados experimentais de resistência ao esmagamento obtidos para a espécie *Pinus sylvestris*. No âmbito do presente trabalho, foram avaliadas apenas ligações carregadas na direção paralela às fibras.

### Ligações de madeira do tipo cavilha

As ligações do tipo cavilha são frequentemente utilizadas em construções de madeira devido à sua instalação simples e eficácia em termos de capacidade de carga. No entanto, um projeto eficiente requer um conhecimento adequado da sua resposta, que é dependente da geometria, direção de carga e propriedades mecânicas da madeira e do aço [5]. Por exemplo, a resistência ao esmagamento da madeira está fortemente relacionada com a sua densidade, que pode variar consideravelmente para espécies distintas de madeira [6, 7]. Por outro lado, o momento de cedência da cavilha metálica depende do seu diâmetro e da classe do aço. Além disso, a relação entre as espessuras dos elementos de madeira e o diâmetro da cavilha, a chamada esbelteza, pode ser usada para garantir modos de falha que atendam aos objetivos de projeto de desempenho predefinidos [8]. Os modos de falha de uma ligação sujeita ao corte duplo estão representados na Figura 1, onde o modo I e o modo Ia correspondem às falhas de esmagamento da madeira para elemento lateral e médio, respectivamente. Os demais modos de falha são caracterizados pela formação de uma (modo II) ou duas rótulas plásticas (modo III) da cavilha.

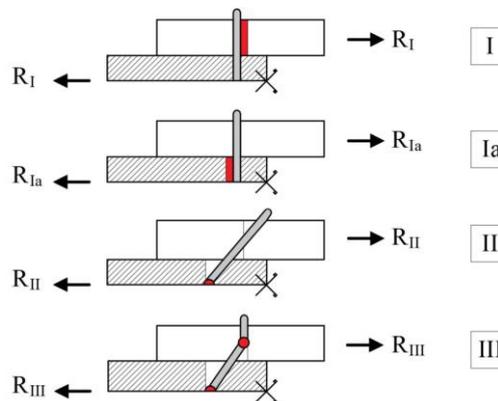


Figura 1: Modos de falha para ligações do tipo cavilha madeira-a-madeira em corte duplo

A capacidade de carga,  $R$ , associada a cada modo de falha, pode ser obtida através da teoria de Johansen [9]. As equações para cada modo de falha estão apresentadas a seguir (Eq. 1).

$$R_I = f_{n,1} \cdot t_1 \cdot d \quad (1a)$$

$$R_{Ia} = 0,5 \cdot f_{n,1} \cdot t_2 \cdot d \quad (1b)$$

$$R_{II} = \frac{f_{n,1} \cdot t_1 \cdot d}{2 + \beta_{fn}} \left[ \sqrt{2\beta_{fn}(1 + \beta_{fn}) + \frac{4\beta_{fn}(2 + \beta_{fn}) \cdot M_y}{f_{n,1} \cdot d \cdot t_1^2}} \right] - \beta_{fn} \quad (1c)$$

$$R_{III} = \sqrt{\frac{2\beta_{fn}}{1 + \beta_{fn}}} \sqrt{2 \cdot M_y \cdot f_{n,1} \cdot d} \quad (1d)$$

Onde  $t_1$  e  $t_2$  são as espessuras dos elementos de madeira lateral e central, respectivamente;  $f_{n,1}$  e  $f_{n,2}$  correspondem à resistência ao esmagamento do elemento lateral e central, respectivamente;  $\beta_{fn} = f_{n,1}/f_{n,2}$  é a razão entre a resistência ao esmagamento dos elementos;  $d$  é o diâmetro da cavilha; e  $M_y$  é o momento de cedência plástica da cavilha.

As expressões derivadas por Johansen [9] para a capacidade de carga, R, foram baseadas em condições de equilíbrio para cada modo de falha considerando simetria da ligação. É importante ressaltar que as Eqs. 1c e 1d, relativas aos modos de falha II e III, não consideram o efeito do atrito ao longo do eixo da cavilha, nem o efeito de corda associado à capacidade de arrancamento da cavilha. A ocorrência de falhas frágeis, devido a tensões perpendiculares às fibras que surgem do efeito de cunha da cavilha na madeira, são evitadas assegurando-se espaçamentos e distâncias adequadas.

### Resistência ao esmagamento

A resistência ao esmagamento é a resistência de um elemento de madeira contra a penetração lateral de uma cavilha rígida. O seu valor é influenciado principalmente pelo ângulo entre a carga e a direção das fibras, a densidade da madeira e o seu teor de água, bem como o diâmetro do cavilha [10]. Os resultados apresentados em [11, 12] foram base da equação fornecida pelo Eurocódigo 5, EC5, [13] para a resistência ao esmagamento na direção paralela às fibras (Eq. 2).

$$f_{h,0} = 0,082(1 - 0,01d)\rho \quad (2)$$

Onde  $d$  é o diâmetro da cavilha [mm] e  $\rho$  é a densidade da madeira [ $\text{kg/m}^3$ ] a um teor de água de equilíbrio de 12%.

A partir da Eq. 2, pode-se concluir que elementos com maior densidade apresentam maior resistência ao esmagamento, enquanto um incremento no diâmetro da cavilha conduz a valores menores. Apesar de não ser considerado diretamente na Eq. 2, é importante referir que um incremento do teor de água da madeira reduz a resistência ao esmagamento dos elementos de madeira [6,14]. De acordo com Glišović *et al.* [15], a Eq. 2 apresenta bons resultados para a maioria das espécies de madeira de resinosas Europeias. No entanto, existem alguns desvios para espécies com densidades mais elevadas ( $\rho \geq 500 \text{ kg/m}^3$ ). Em Sandhaas *et al.* [14], foram realizados ensaios de esmagamento com cinco espécies de madeiras diferentes, entre as quais três são espécies folhosas tropicais. Os autores concluíram que a equação de resistência ao esmagamento do EC5 penaliza espécies de madeira com densidades mais elevadas e superestima a resistência ao esmagamento de espécies caracterizadas por baixas densidades. Esta afirmação é apoiada pelo trabalho de Leijten *et al.* [16], que envolve uma quantidade considerável de dados experimentais, incluindo [17, 18]. Uma análise probabilística permitiu aos autores propor parâmetros distintos para madeiras de resinosas (Eq. 3b) e madeiras de folhosas (Eq. 3c) a partir do ajuste dos dados no modelo apresentado na (Eq. 3a).

$$f_{h,0} = A \cdot \rho^B \cdot d^C \quad (3a)$$

$$f_{h,0} = 0,097 \cdot \rho^{1,07} \cdot d^{-0,25} \quad (3b)$$

$$f_{h,0} = 0,087 \cdot \rho^{1,09} \cdot d^{-0,25} \quad (3c)$$

### Campanha experimental

Da revisão bibliográfica apresentada, conclui-se que é fundamental a realização de trabalhos experimentais para avaliar a resistência ao esmagamento de elementos de madeira. O ensaio de esmagamento realizado consiste num ensaio de compressão, conforme ilustrado na Figura 2, onde a carga é aplicada por um atuador hidráulico com célula de carga de 50 kN por controle de deslocamento.

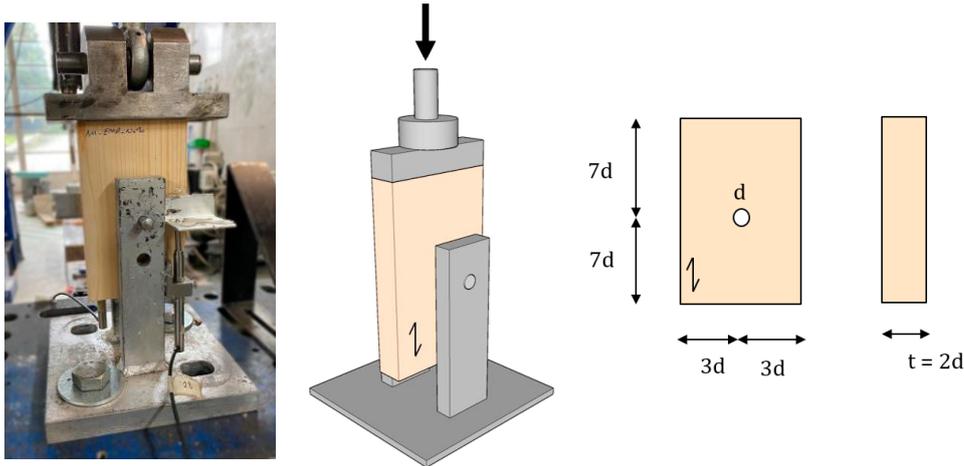


Figura 2: Esquema do setup de ensaio

O deslocamento, medido ao nível da cavilha, é obtido pela média das medidas adquiridas tanto pelo LVDT1 quanto pelo LVDT2 (+/- 5mm), colocados em cada lado do provete, conforme pode ser visto na Figura 2. Uma placa de aço rígida é colocada no topo do provete a fim de distribuir uniformemente a carga aplicada. Apenas cavilhas de 12 mm de diâmetro foram usadas para os ensaios de resistência ao esmagamento e as dimensões dos membros de madeira estão apresentadas no esquema da Figura 2, e seguem o estabelecido na EN 383:2016 [19]. O elemento de madeira foi colocado entre duas chapas de aço laterais de 20 mm de espessura (classe S275), furadas para possibilitar a colocação da cavilha.

Foram avaliados 119 elementos de MLC (madeira lamelada colada) da espécie *Pinus sylvestris*. A Figura 3 apresenta um gráfico de dispersão dos resultados entre a resistência ao esmagamento,  $f_{h,0}$ , e a densidade da madeira,  $\rho$ , para teor de água de 12%.

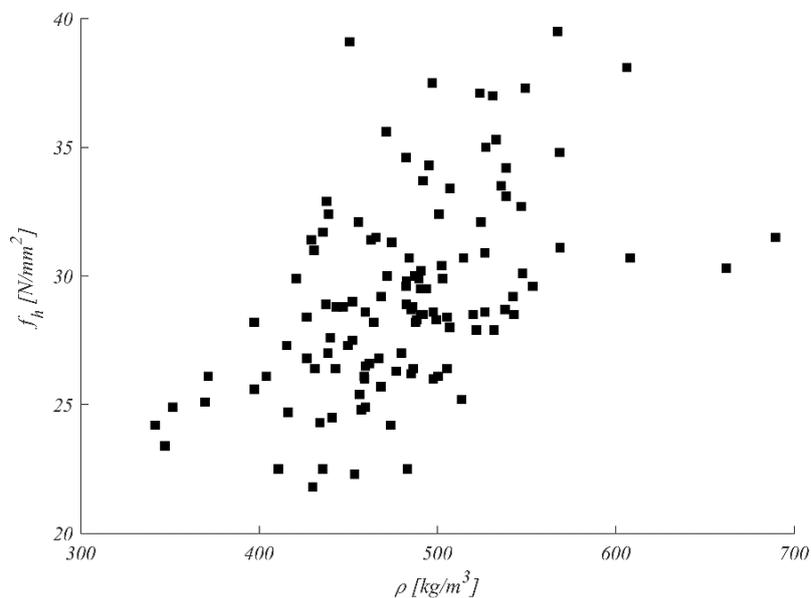


Figura 3: Gráfico de dispersão dos resultados experimentais obtidos para  $f_h$  e  $\rho$

Na Figura 4, juntamente com o gráfico de dispersão dos resultados experimentais, estão apresentados os modelos para a resistência ao esmagamento preconizados pelo EC5 (Eq. 2), e o modelo proposto por Leijten *et al.* [16] (Eq. 3a). Como nos ensaios realizados foi utilizado um diâmetro fixo de 12 mm para a cavilha, a Eq. 3a pode ser reescrita na forma da Eq. 4, desconsiderando o termo  $d$ .

$$f_{h,0} = A \cdot \rho^B \quad (4)$$

Os parâmetros A e B da Eq. 4 foram obtidos através do ajuste dos dados por regressão linear pelo método dos mínimos quadrados e resultam em  $A = 1,0775$  e  $B = 0,5331$ . A qualidade do ajuste dos modelos é quantificada pelo coeficiente de determinação,  $R^2$ , apresentado na Figura 4.

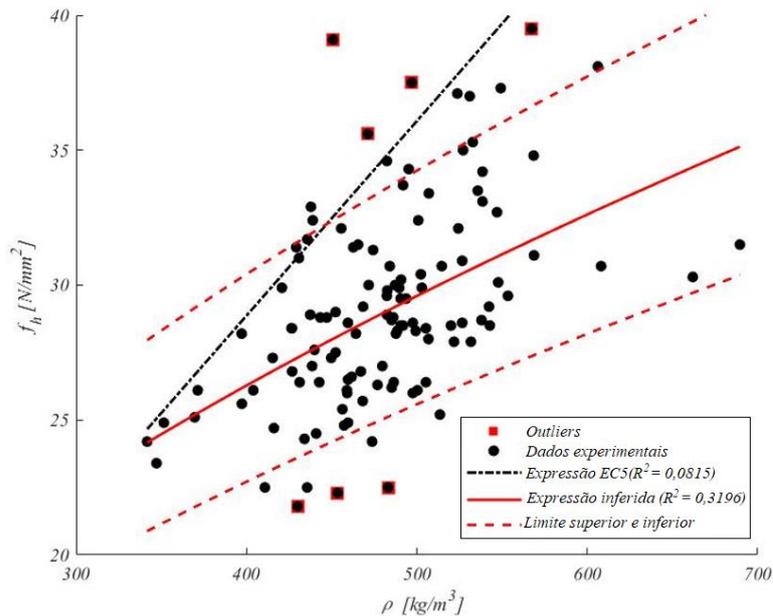


Figura 4: Comparação da equação normativa (EC5) com a inferida a partir dos dados experimentais

### Análise de fiabilidade

Como foi possível observar nos resultados obtidos na campanha experimental realizada, a resistência ao esmagamento da madeira apresenta elevada variabilidade. Portanto, para entender adequadamente o seu comportamento e garantir um nível de segurança de projeto aceitável, pode-se aplicar uma análise baseada em fiabilidade. Os métodos probabilísticos permitem incluir variações e incertezas no modelo matemático levando a um projeto mais adequado.

Um dos primeiros aspectos a serem considerados numa análise de fiabilidade é a determinação de uma função de estado limite, geralmente representada por  $g(X)$  (Eq. 5). A função de estado limite consiste numa função de variáveis aleatórias que fornece uma medida de desempenho, dividindo o domínio entre uma região segura,  $g(X) \geq 0$ , e uma região de falha,  $g(X) < 0$ :

$$g(X) = R(X) - S(X) \quad (5)$$

Onde  $X$  é o vetor de variáveis aleatórias;  $R(X)$  é a variável aleatória referente à resistência; e  $S(X)$  a variável aleatória referente à solicitação. As variáveis aleatórias costumam ser representadas por uma função de distribuição de probabilidade. Um ajuste adequado de funções conhecidas aos dados é primordial para a avaliação da fiabilidade. Neste contexto, foi conduzido um ajuste de distribuição de probabilidade aos dados disponíveis para a densidade da madeira através do teste de inferência Anderson-Darling. A distribuição que melhor se adequou aos dados foi a LogNormal (ver Figura 5).

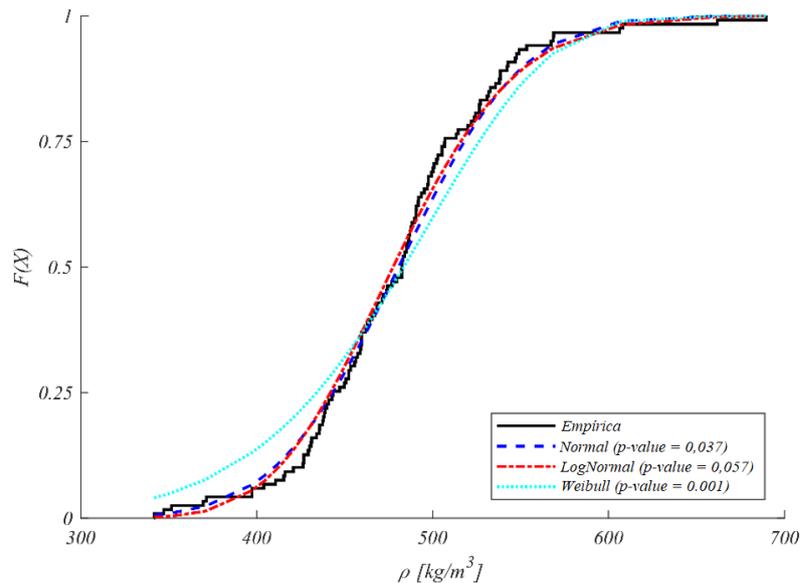


Figura 5: Comparação da função de distribuição acumulada (CDF) empírica com as CDF's ajustadas aos dados para a densidade  $\rho$

A fim de comparar os dados gerados por ambas as equações e os dados experimentais obtidos para a resistência ao esmagamento,  $f_{h,0}$ , foram geradas amostras da densidade,  $\rho$ , por simulação de Monte Carlo. A partir das equações normativa (EC5) e inferida, foi possível obter amostras do esmagamento da madeira,  $f_{h,0}$ . Observando as funções de distribuição acumulada, CDF, empírica para os dados obtidos experimentalmente e os dados gerados, chega-se à conclusão de que a equação normativa sobrestima o valor da resistência ao esmagamento (comportamento já indicado pela Figura (4)), enquanto a equação inferida se comporta de forma muito semelhante aos dados experimentais. Além disso, foi realizado o teste estatístico t entre as amostras geradas e a amostra experimental, primeiro entre os dados gerados pela equação normativa e os experimentais, e posteriormente para a equação inferida e os dados experimentais. O teste aceitou a hipótese para uma significância de 5% somente para os dados da equação inferida. O p-value encontrado para cada um dos testes está apresentado na Figura 6.

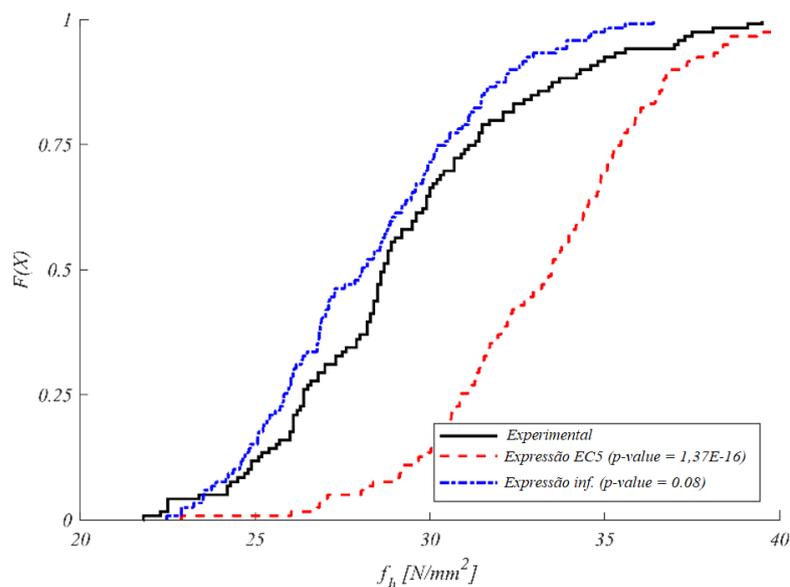


Figura 6: Comparação das CDF empíricas dos dados gerados pelas equações do EC5 e inferida com os dados experimentais para a resistência ao esmagamento  $f_{h,0}$

Finalmente, o impacto da adoção da equação normativa é avaliado em termos de uma análise de fiabilidade. Foi analisada a fiabilidade do projeto de ligações de madeira do tipo cavilha de acordo com as diretrizes do EC5. A avaliação é feita considerando a interação entre os modos de falha

(Figura 1) proposta por Köhler [15]. Isto é, considera-se a falha do sistema quando um dos elementos laterais (1 ou 2) resulta no modo de falha I, o elemento central resulta no modo de falha Ia ou ocorre a rotura da cavilha (modos de falha II ou III) (veja a Figura 1). Baseada nessa combinação, um conjunto de equações de estado limite foram definidas para avaliar a fiabilidade do sistema (Eq. 6).

$$g_1 = 2z_d R_{I,1} - S_G - S_Q \quad (6a)$$

$$g_2 = 2z_d R_{I,2} - S_G - S_Q \quad (6b)$$

$$g_3 = 2z_d R_{Ia} - S_G - S_Q \quad (6c)$$

$$g_4 = z_d (R_{II,1} + R_{II,2}) - S_G - S_Q \quad (6d)$$

$$g_5 = z_d (R_{III,1} + R_{III,2}) - S_G - S_Q \quad (6e)$$

$$g_6 = z_d (R_{II,1} + R_{III,2}) - S_G - S_Q \quad (6f)$$

$$g_7 = z_d (R_{III,1} + R_{II,2}) - S_G - S_Q \quad (6g)$$

Onde  $z_d$  é a variável de projeto (Eq. 7),  $S_G$  e  $S_Q$  são as cargas permanentes e variáveis, respectivamente.

$$z_d = \frac{\gamma_G S_{G,k} + \gamma_Q S_{Q,k}}{2R_k} \gamma_M \quad (7)$$

O subíndice  $k$  refere-se aos valores característicos das variáveis, e  $\gamma_G$ ,  $\gamma_Q$ , e  $\gamma_M$  são os coeficientes de segurança parciais das cargas permanente, variável e do material, respetivamente. A Tabela 1 apresenta a informação estatística das variáveis aleatórias envolvidas no problema. A tensão última do aço da cavilha,  $f_u$ , é utilizada para determinação do momento efetivo de cedência plástica,  $M_y$  (Eq. 8). As informações apresentadas na Tabela 1 foram obtidas a partir de Köhler [15], com exceção da densidade,  $\rho$ , inferida a partir dos dados experimentais obtidos neste trabalho.

$$M_y = 0,3 \cdot f_u \cdot d^{2,6} \quad (8)$$

Tabela 1: Informação estatística das variáveis utilizadas no modelo

	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]	$f_u$ [MPa]	$S_G$ [N]	$S_Q$ [N]
Distribuição	Lognormal	Lognormal	Normal	Gumbel
Valor médio	480,7	427	1000	1200
Desvio padrão	55,7	17	100	480
Percentil	5%	5%	50%	98%
Valor característico	397,3	400	1000	2444
<b><math>\gamma_M = 1.3</math></b>			<b><math>\gamma_G = 1.35</math></b>	<b><math>\gamma_Q = 1.5</math></b>

A probabilidade de falha,  $P_f$ , pode ser estimada como a probabilidade da união das equações de estados limite  $g_i$  assumindo valores menores ou iguais a zero, conforme indicado pela Eq. 9.

$$P_f = P \left( \bigcup_{i=1}^7 g_i \leq 0 \right) \quad (9)$$

A fiabilidade do sistema é avaliada através do método de simulação de Monte Carlo com amostragem de importância para 1E5 simulações. O critério de convergência é definido para um coeficiente de variação da probabilidade de falha,  $CVP_f$ , de 0,01. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 7.

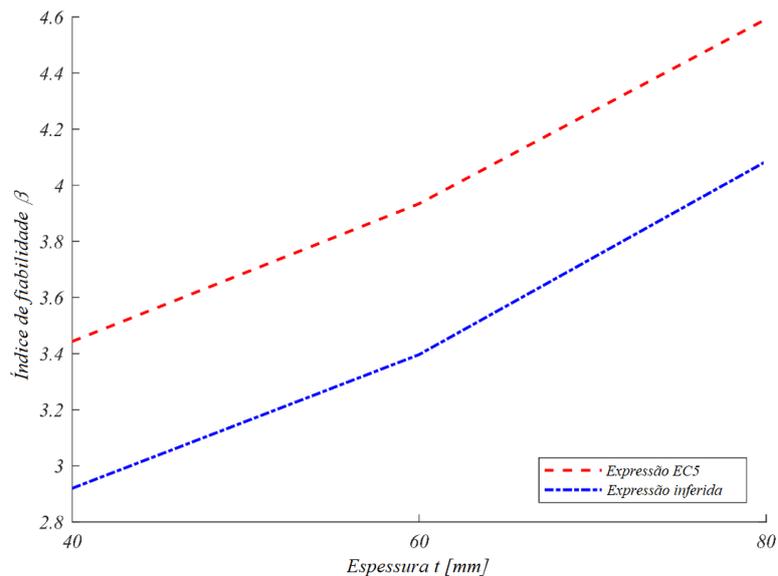


Figura 7: Índice de fiabilidade obtido a partir do modelo normativo e inferido

A diferença no índice de fiabilidade obtida empregando os dois modelos ficou entre 11% e 15%. Essa estimativa indica que a utilização da equação normativa (EC5) para a resistência ao esmagamento localizado leva a uma falsa medida de segurança, uma vez que não é um modelo fiável tendo em conta os resultados experimentais obtidos.

## Conclusão

Este estudo investigou a correlação entre a resistência da madeira ao esmagamento, que é um importante parâmetro de projeto de ligações de madeira do tipo cavilha. Através de uma análise estatística, foi demonstrado que a equação normativa prevista pelo Eurocódigo 5 falha em prever o comportamento da resistência ao esmagamento para elementos de madeira lamelada colada da espécie *Pinus sylvestris*. Com base nos resultados experimentais obtidos neste trabalho, foi proposta uma equação alternativa, através de ajuste pelo método dos mínimos quadrados.

Uma análise de fiabilidade do projeto desse tipo de ligações permitiu quantificar a influência da adoção dos diferentes modelos para a resistência ao esmagamento na sua probabilidade de falha, isto é, o modelo normativo e aquele inferido neste trabalho. Os resultados mostram uma diferença considerável de até 15% entre os dois modelos empregues. O modelo proposto pelo Eurocódigo 5 apresenta uma falsa medida de segurança, uma vez que superestima os valores de resistência ao esmagamento comparativamente aos valores obtidos na campanha experimental.

## Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por fundos nacionais através da FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia no âmbito do projecto Timquake POCI-01-0145-FEDER-03203 e através de bolsa de doutoramento 2021.07308.BD concedida a primeira autora.

## Referências

- [1] J. Köhler, *Reliability of timber Structures*, vdf Hochschulverlag AG (2007).
- [2] A.B. Cheung, E.M. Pinto, C.J. Calil, *Confiabilidade Estrutural de Vigas de Madeiras submetidas a Flexão em Condições Normais e em Situação de Incêndio*, Madeira: Arquitetura e Engenharia, 12 (2011) 1–12.
- [3] J. Köhler, *A Probabilistic Framework for the Reliability Assessment of Connections with Dowel Type Fasteners*, Proceedings of the 38th CIB-W18 meeting (2005).

- [4] G.C. Foliente, *Design of Timber Structures Subjected to Extreme Loads*, Progress in Structural Engineering and Materials, Wiley Online Library, 1 (1998) 236–244.
- [5] S. Thelandersson, H.J. Larsen, *Timber Engineering*, John Wiley & Sons, (2003).
- [6] C.L. Santos, A.M.P. de Jesus, J.J.L. Morais, J.L.P.C. Lousada, *A Comparison Between the EN 383 and ASTM D5764 Test Methods for Dowel-Bearing Strength Assessment of Wood: Experimental and Numerical Investigations*, Wiley Online Library, 46 (2010) 159–174.
- [7] J. M. Branco, H. S. Sousa, P. B. Lourenço, *Experimental Analysis of Maritime Pine and Iroko Single Shear Dowel-Type Connections*, Construction and Building Materials, 111 (2016) 440–449.
- [8] A. J. M. Jorissen, *Double Shear Timber Connections with Dowel Type Fasteners*, Delft University Press Delft, The Netherlands, (1998).
- [9] K. W. Johansen, *Theory of Timber Connections*, Int. Assoc. Bridge Structural Engineering, 9 (1949) 249–262.
- [10] D. R. Rammer, S. G. Winistorfer, *Effect of Moisture Content on Dowel Bearing Strength*, Wood and Fiber Science, 33 (1) (2007) 126–139.
- [11] L. Whale, I. Smith, B. O. Hilson, *Behaviour of Nailed and Bolted Joints Under Short-Term Lateral Load - Conclusion from Recent Research*, Proceedings CIB-W18 meeting, Florence, Italy (1986).
- [12] L. Whale, I. Smith, *The Derivation of Design Clauses for Nailed And Bolted Joints in Eurocode 5*, Proceedings CIB-W18 meeting, Florence, Italy (1986).
- [13] Eurocode 5. *Design of timber structures – part 1-1: general – common rules and rules for buildings. Standard BS EN 1995-1-1*, CEN – European Committee for Standardization (2014).
- [14] C. Sandhaas, G. J. P. Ravenshorst, H. J. Blass, J. W. G. Van de Kuilen, *Embedment Tests Parallel-To-Grain and Ductility Aspects Using Various Wood Species*, European Journal of Wood and Wood Products, 71 (5) (2013) 599–608.
- [15] I. Glišović, B. Stevanović, T. Kočetov-Mišulić, *Embedment test of wood for dowel-type fasteners*, Wood Research, 57 (4) (2012) 639–650.
- [16] A. Leijten, J. Köhler, and A. Jorissen. *Review of probability data for timber connections with dowel-type fasteners*, Proceedings of CIB-W18, 37-7 (2004).
- [17] L. R. J. Whale, I. Smith, *A Method for Measuring the Embedding Characteristics of Wood and Wood-Based Materials*, Materials and Structures, 22 (6) (1989) 403–410.
- [18] K. Sawata, M. Yasumura, *Determination of Embedding Strength of Wood for Dowel-Type Fasteners*, Journal of Wood Science, 48 (2) (2002) 138–146.
- [19] EN 383. *Timber structures: Test Methods - Determination of embedment strength and foundation values for dowel type fasteners*, CEN – European Committee for Standardization (2017).

---

# CAPÍTULO 7

---

## PATRIMÓNIO CULTURAL

## Propriedades e degradação de pedras muito porosas com expressão no património português

FONSECA B. Sena da<sup>1,a</sup>, PINTO A.P. Ferreira<sup>2,b</sup>, PIÇARRA S.<sup>1,3,c</sup>,  
MONTEMOR M.F.<sup>1,d</sup>

<sup>1</sup>Centro de Química Estrutural, Institute of Molecular Sciences, Departamento de Engenharia Química, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001 Lisboa, Portugal

<sup>2</sup>CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, 1049-001 Lisboa, Portugal

<sup>3</sup>Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Instituto Politécnico de Setúbal, 2839-001 Lavradio, Portugal

<sup>a</sup>bruno.fonseca@tecnico.ulisboa.pt, <sup>b</sup>anapinto@civil.ist.utl.pt,  
<sup>c</sup>susana.picarra@estbarreiro.ips.pt, <sup>d</sup>mfmontemor@tecnico.ulisboa.pt,

**Palavras-chave:** “Pedra de Ançã”, Grés de Silves, Património, Degradação, Conservação.

**Resumo.** A “Pedra de Ançã”, variedade que integra os “Calcários de Ançã” característicos da região centro do país, e o Grés de Silves, que aflora no Algarve, são exemplos de variedades pétreas utilizadas como material de construção no património cultural de Portugal e que frequentemente têm em comum a sua elevada porosidade, superior a 20%, e reduzida resistência mecânica ( $R_c < 40$  MPa). O presente trabalho apresenta as anomalias mais frequentes nestas variedades com o objectivo de melhor compreender os fenómenos responsáveis pela sua presença, analisando brevemente as suas propriedades mineralógicas, físicas, mecânicas e microestruturais. Apesar de serem variedades pétreas com valores de porosidade e resistência mecânica comparáveis, a suscetibilidade à degradação e anomalias que manifestam são fortemente condicionadas por outras propriedades intrínsecas (ex.: porometria). Finalmente, identificam-se potenciais ações de conservação que visem a salvaguarda do património construído com estas duas variedades pétreas.

### Introdução

Portugal apresenta uma vasta diversidade de recursos geológicos, entre os quais, rochas com características adequadas à sua utilização como material de construção com propriedades decorativas, habitualmente referidas como “pedras”, após a sua exploração e transformação. Com efeito, existem mais de 150 tipos de pedras identificadas e caracterizadas no “Catálogo de Rochas Ornamentais Portuguesas” [1], mas muitas outras foram (e continuam a ser) usadas como material de construção com propósitos estruturais e/ou ornamentais (alvenaria, pavimentos, revestimentos, etc.). A sua disponibilidade local, a facilidade de extração e aptidão para serem talhadas e esculpidas foram, ao longo dos séculos, critérios fundamentais de selecção dos recursos geológicos a explorar com a finalidade de virem a ser utilizados na construção. Na região centro de Portugal destaca-se a “Pedra de Ançã”, designação utilizada com alguma frequência para referir variedades pétreas que integram os “Calcários de Ançã”, e que foram amplamente utilizadas a partir do século XIII em mosteiros, igrejas, capelas e em estatuária, e que se encontram actualmente presentes em património português de elevado valor, dos quais são exemplo a Porta Férrea da Universidade de Coimbra, o Mosteiro de Santa Cruz (Figura 1 a), o Palácio de Queluz (Figura 1 b), o Convento de Celas, entre outros [2, 3].

Na zona sul de Portugal, nomeadamente no Algarve, o Grés de Silves é uma variedade pétreia com presença importante no património da região, como testemunham os inúmeros objectos e monumentos, incluindo necrópoles e menires pré-históricos (Figura 1 c), vestígios arqueológicos islâmicos, assim como importantes construções como a Sé, Castelo e Ponte de Silves (Figura 1 d e e).

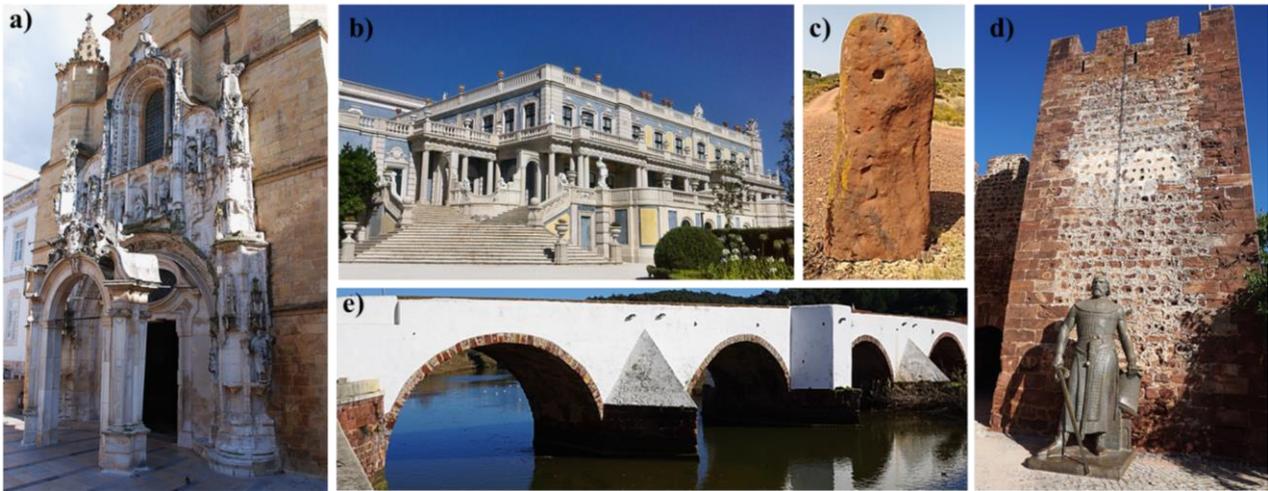


Figura 1: Monumentos construídos com “Pedra de Ançã” (a) Mosteiro de Santa Cruz; b) Palácio de Queluz) e Grés de Silves (c) Menir da Vilarinha; d) Castelo de Silves; e) Ponte de Silves)

Pela sua vasta utilização no património cultural português, a “Pedra de Ançã” e o Grés de Silves são dois exemplos de variedades pétreas com relevância histórica que apresentam elevada porosidade. De facto, a elevada porosidade e a reduzida resistência mecânica são responsáveis por uma boa aptidão ao talhe, no entanto, estes factores, que potenciaram a sua utilização, são também responsáveis pela sua significativa susceptibilidade à degradação.

A elevada porosidade da “Pedra de Ançã” e do Grés de Silve promove uma fácil absorção de água e transporte de sais, os quais se têm revelado responsáveis por importantes fenómenos de degradação em monumentos que integram estas variedades pétreas [2, 4]. Monumentos em “Pedra de Ançã” registam frequentemente a presença de sais solúveis e processos de degradação que originam perda de material associados a formas de degradação do tipo pulverização, alveolização e escamação, como mostra a Figura 2 a, b e c. A elevada porosidade do Grés de Silves contribui também para a presença frequente de eflorescências (Figura 2 d) e de formas de degradação que envolvem perda de massa nos monumentos compostos por Grés de Silves, de que são exemplos a desagregação granular e a alveolização (Figura 2 e).

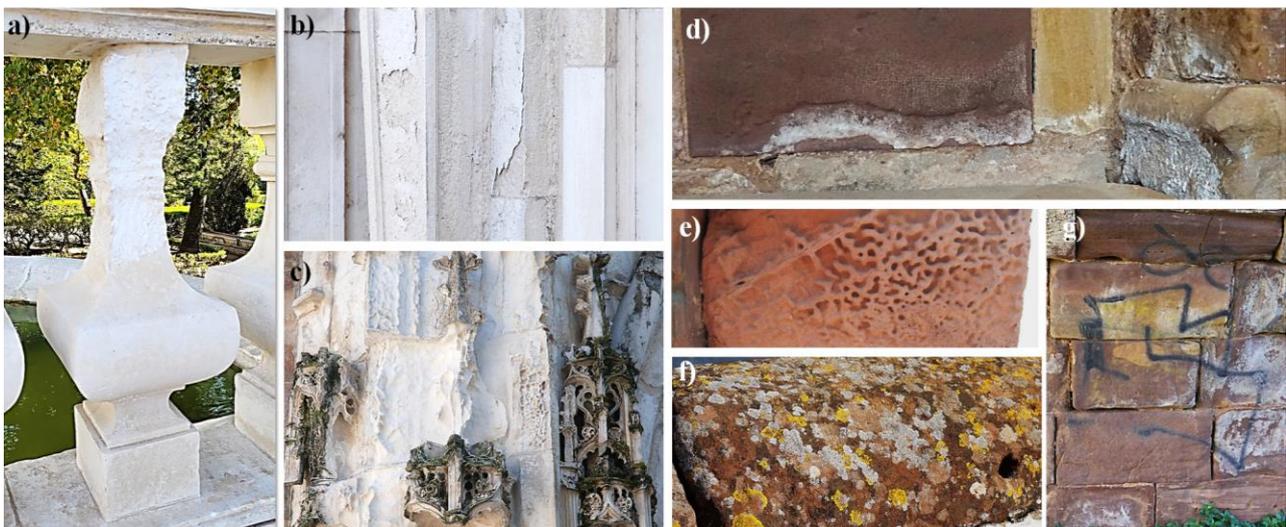


Figura 2: Alguns exemplos de anomalias em “Pedra de Ançã” (a) pulverização e escamação, Palácio de Queluz; b) escamação, Palácio de Queluz; c) alveolização e biocolonização, Mosteiro de Santa Cruz) e em Grés de Silves (d) cristalização de sais, Sé de Silves; e) alveolização, Igreja Matriz de S. Bartolomeu de Messines; f) biocolonização, Ponte de Silves, g) Graffiti, Ponte de Silves)

Com efeito, as duas variedades pétreas são particularmente susceptíveis a fenómenos de perda de massa superficial que podem atingir espessuras significativas (Figura 2), o que por sua vez conduz à perda do significado histórico e artístico das superfícies e objectos.

Por outro lado, a sua elevada porosidade e capacidade de transporte de água também favorecem o desenvolvimento de colonização biológica, como exemplifica a Figura 2 c e f. Finalmente, estas características, em conjunto com outras, potenciam a perda do significado histórico e estético dos monumentos por acção dos graffitis (Figura 2 g) uma vez que estas variedades pétreas apresentam superfícies cuja total remoção dos agentes corantes é extremamente difícil e acarreta grandes riscos para a sua integridade.

A importância da “Pedra de Ançã” e do Grés de Silves no património português, assim como as suas semelhanças e diferenças, justificam a análise do potencial impacto de algumas das suas propriedades mineralógicas, físicas e mecânicas na susceptibilidade à degradação que manifestam, com o objectivo de contribuir para a identificação de potenciais acções de conservação que possam vir a ser consideradas no âmbito de futuras intervenções. Para tal, este trabalho analisa um conjunto dessas propriedades, tendo como referência actuais indicadores utilizados na avaliação da qualidade de pedras naturais, e realiza um breve estudo quanto à sua susceptibilidade à degradação.

### Materiais pétreos

Foram estudadas 3 variedades de “Pedra de Ançã”, com características compatíveis com a variedades históricas utilizadas em monumentos, nomeadamente elevada porosidade e grande homogeneidade em termos de cor (Figura 3), que se distinguem de variedades de “Calcário de Ançã” cinzentas – mais argilosas – também presentes na região, mas menos porosas do que as habitualmente referidas como “Pedra de Ançã”.

Apesar da maioria das variedades de “Pedra de Ançã” serem consideradas porosas, ou muito porosas, em termos absolutos, no presente trabalho as variedades estudadas serão denominadas em função das suas porosidades relativas, isto é, “Pedra de Ançã” com porosidade baixa (PB  $\approx$ 16%), porosidade intermédia (PI  $\approx$ 22%) e porosidade elevada (PE  $\approx$ 27%).

Com propósitos meramente comparativos, seleccionou-se ainda uma das pedras naturais mais porosas actualmente em exploração (Rosal AR: Tabela 1), Figura 3.

O Grés de Silves utilizado no estudo apresenta propriedades físicas comparáveis com as avaliadas em blocos presentes em monumentos de Silves [5].

Alguns dos dados em análise neste estudo encontram-se publicados em diversos documentos elaborados com objectivos distintos. Sempre que se recorre a dados anteriormente publicados, o respectivo documento é devidamente citado, por oposição, quando nenhum documento é citado trata-se de dados ou formas de apresentação não publicados.

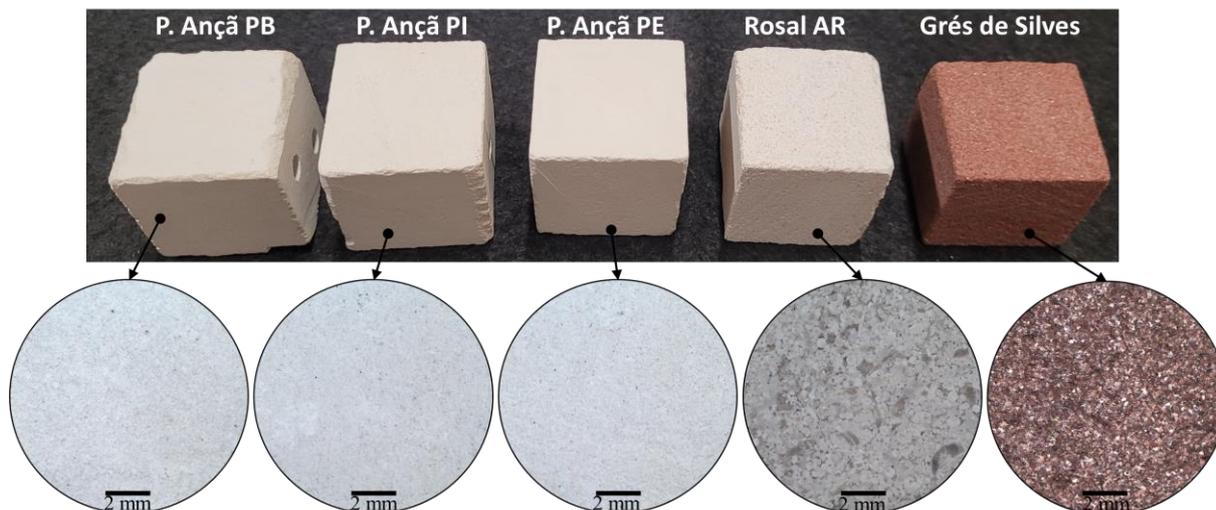


Figura 3: Aspecto macroscópico e à lupa binocular das variedades pétreas em estudo: “Pedra de Ançã” de porosidade baixa (PB), intermédia (PI) e elevada (PE), Calcário Rosal AR e Grés de Silves

## Características mineralógicas

A caracterização mineralógica das variedades pétreas foi realizada com recurso a Difraccção de Raio-X [6-8] e o resumo da sua composição é apresentado na Tabela 1.

Não se identificaram diferenças relevantes entre as variedades de “Pedra de Ançã” do ponto de vista mineralógico, uma vez que as três variedades são fundamentalmente compostas por calcite (carbonato de cálcio) e contêm quantidades reduzidas de quartzo. O Rosal AR é também composto por calcite, não tendo sido detectado qualquer outro mineral secundário por esta técnica. O Grés de Silves apresenta uma maior variedade mineralógica, sendo principalmente composto por grãos de quartzo e registando a presença de feldspato, minerais argilosos e hematite em quantidades mais reduzidas.

Tabela 1: Composição mineralógica determinada por Difraccção de Raio-X [6-8]

		Calcite	Quartzo	Feldspato	Caolinite	Ilite/mica	Hematite
“Pedra de Ançã”	PB	+++	+	n.d.			
	PI	+++	+	n.d.			
	PE	+++	+	n.d.			
Rosal AR		+++	n.d.	n.d.			
Grés de Silves		n.d.	+++	+	+	-	-

+++ : Mineral principal; ++ : Presença significativa; + : Presença reduzida; - : Presença muito reduzida; n.d.: não detectado

Considerando que todos os calcários em análise (de Ançã e Rosal AR) são maioritariamente compostos por calcite, e que esta é particularmente susceptível à dissolução por processos químicos, quando comparado com os minerais constituintes de outras pedras, é expectável que a sua susceptibilidade a este tipo de fenómenos de degradação seja maioritariamente condicionada por outros factores que se relacionam com parâmetros físicos e texturais. Por este motivo, não é expectável registarem-se diferenças de susceptibilidade à degradação relevantes entre as variedades de “Pedra de Ançã” e o Rosal AR desencadeadas por processos químicos tendo em consideração exclusivamente as propriedades mineralógicas.

Por outro lado, a presença de minerais argilosos no Grés de Silves, ainda que em reduzidas quantidades, pode ser um parâmetro com um importante papel na sua susceptibilidade à degradação, uma vez que a expansibilidade destes minerais é uma conhecida causa de degradação de materiais pétreos.

## Características físicas e mecânicas

Todas as variedades pétreas analisadas apresentam valores de porosidade iguais ou superiores a 16% (Tabela 2) e, portanto, todas se classificam como pedras de elevada ou muito elevada porosidade de acordo com diversas classificações [9-11]. As variedades PI e PE, e o Grés de Silves, classificam-se como variedades de muito elevada porosidade, por terem porosidades superiores a 20%, valores mais elevados do que os de outras variedades pétreas porosas actualmente empregues como “rochas ornamentais” [10] – ver Tabela 3.

Tabela 2: Classificação pedras em função da porosidade aberta de acordo com o proposto em [9]

		Porosidade aberta (%)	Abs. de água à pr. atmos. (%)	Rest. comp. (MPa)	Vel. prop. ultrasons (m/s)	Coef. de saturação (%)	Coef. de abs. de água cap. (kg/m <sup>2</sup> /min <sup>0.5</sup> )
“Pedra de Ançã”	PB	<sup>a</sup> 15,9±1,2	<sup>a</sup> 5,8±0,5	46,7±8,6	4410±270	<sup>a</sup> 81,1±1,8	0,371±0,062
	PI	<sup>a</sup> 22,2±0,9	<sup>a</sup> 10,4±0,6	34,9±6,7	3720±302	<sup>a</sup> 98,0±2,1	0,905±0,162
	PE	<sup>b</sup> 26,8±0,7	<sup>b</sup> 11,8±0,6	<sup>b</sup> 23,0±0,5	3410±108	<sup>b</sup> 87,2±1,7	1,167±0,080
Rosal AR		<sup>c</sup> 16,0±0,2	<sup>c</sup> 6,0±0,1	32,6±1,4	4250±107	<sup>c</sup> 84,8±1,1	0,561±0,056
Grés de Silves		22,6±0,5	<sup>b</sup> 7,6±0,4	<sup>b</sup> 21,9±2,8	3330±139	<sup>b</sup> 67,4±2,1	1,771±0,135

Legenda: <sup>a</sup>[6]; <sup>b</sup>[8]; <sup>c</sup>[7]

Tabela 3: Classificação de “rochas ornamentais” em função da porosidade aberta de acordo com o proposto em [9]

Classe de Porosidade	Porosidade aberta (%)	Exemplos de variedades de pedras portuguesas
Muito elevada	>20%	“Pedra de Ançã”, Grés de Silves
Elevada	10-20%	Calcário Rosal AR, Semi-rijo do Arrimal, Semi-rijo do Codaçal
Média	5-10%	Calcário Moleanos Macio, Calcário Moca Creme, Calcário Semi-rijo de Cabeça Veada
Reduzida	2.5-5%	Granito amarelo de Mondim
Muito reduzida	<2.5%	Mármore de Estremoz, Mármore de Trigaches, Calcário Azul Cascais, Calcário Moleanos Rijo, Lioz, Amarelo de Negrais, Granito de Alpalhão (SPI)

Todas as variedades apresentam também um valor alto de absorção de água à pressão atmosférica - i.e. igual ou superior a 6%. De facto, os elevados valores de absorção de água à pressão atmosférica são compatíveis com os elevados valores de porosidade, existindo inclusivamente uma boa correlação entre estas duas propriedades para as variedades pétreas em análise (Tabela 2).

Com excepção da “Pedra de Ançã” menos porosa (PB), todas as variedades têm uma reduzida resistência à compressão ( $R_c < 40\text{MPa}$  [11]), sendo a variedade PE e o Grés de Silves as que apresentam os valores mais baixos, inferiores a 25MPa. Os valores de porosidade e resistência à compressão são suportados pela velocidade de propagação de ultrasons (Tabela 2) que também é um bom indicador da integridade e resistência mecânica.

A porosidade e a resistência à compressão, duas das mais generalizadas propriedades utilizadas na caracterização de materiais pétreos, assim como a absorção de água à pressão atmosférica, têm vindo a ser utilizadas como indicadores de “qualidade” de pedras naturais a que se associa a sua susceptibilidade à degradação em relação a várias acções, entre as quais a cristalização de sais, ciclos gelo-degelo e colonização biológica [11]. Assim, de acordo com os indicadores de qualidade actuais [11], e face aos seus elevados valores de porosidade aberta e absorção de água à pressão atmosférica, e baixa resistência mecânica, todas as variedades analisadas aparentam uma reduzida qualidade e potencial reduzido desempenho para a maioria das aplicações na construção [11], particularmente as o Grés de Silves e PE.

Não obstante estas propriedades, e a resistência mecânica em particular [12][12], tenham um papel importante na durabilidade das pedras, diversos autores assumem que o impacto da microestrutura e das propriedades de transporte de água é potencialmente maior do que a resistência mecânica [13].

Os valores do coeficiente de saturação e de absorção capilar apresentam uma fraca correlação com as propriedades acima analisadas, especialmente com a porosidade e absorção de água à pressão atmosférica (Tabela 3), muito embora sejam de alguma forma interdependentes. Por exemplo, muito embora a “Pedra de Ançã” com porosidade intermédia (PI) e o Grés de Silves possuam valores de porosidade da mesma ordem de grandeza, 22% e 23% respectivamente, o PI tem um coeficiente de saturação bastante mais elevado (98%) do que o Grés de Silves (67%), e o Grés de Silves manifesta um coeficiente de absorção de água capilar ( $1,8 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{0.5}$ ) bastante superior ao PI ( $0,9 \text{ kg/m}^2/\text{min}^{0.5}$ ). Esta fraca correlação entre os valores do coeficiente de saturação e absorção capilar com os valores de porosidade e absorção de água à pressão atmosférica indica que estas propriedades têm potencialmente diferente impacto na susceptibilidade à degradação destas variedades pétreas.

As variedades mais prososas (PE e Grés de Silves) manifestam uma velocidade de absorção de água por capilaridade 2 a 3x superior à do Rosal AR, característica indiciadora da facilidade de penetração de sais solúveis, ou outras soluções agressivas, no interior das suas estruturas porosas.

Por outro lado, o Grés de Silves apresenta um coeficiente de saturação significativamente inferior a todas as outras variedades estudadas, consequência do facto do seu espaço poroso ser tendencialmente contituído por poros de maiores dimensões ( $\varnothing \approx 10 \mu\text{m}$ ), Figura 4. De facto, as variedades pétreas denotam dimensões médias dos poros distintas apesar de apresentarem distribuições com configuração semelhante: unimodal, ligeiramente assimétrica esquerda. No caso das variedades de “Pedra de Ançã” a dimensão média dos poros varia entre  $0,2 \mu\text{m}$  e  $0,4 \mu\text{m}$ , e

aumenta com o aumento da porosidade. No Rosal AR, que tem uma baixa porosidade, apresenta uma percentagem de poros de maior dimensão, em torno de 0.5  $\mu\text{m}$  [6, 7, 10].

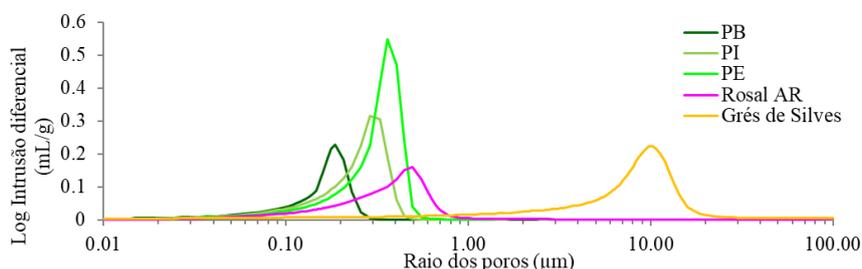


Figura 4: Distribuições das dimensões dos poros das variedades analisadas determinadas por porosimetria por intrusão de mercúrio

A inexistência de uma relação directa (ou inversa) entre as propriedades físicas e mecânicas destas variedades pétreas, muitas vezes utilizadas como indicadores simples de durabilidade de materiais pétreos, evidencia a dificuldade, ou mesmo impossibilidade, de prever a potencial susceptibilidade relativa à degradação das pedras em estudo face a agentes de degradação com recurso à comparação directa destas propriedades.

### Susceptibilidade à degradação

**Cristalização de sais (baseado em modelo).** Existem actualmente diversos modelos para prever a durabilidade de pedras, que têm como base o recurso a indicadores relativos à facilidade com que o seu espaço poroso consegue ser percolado e preenchido por soluções, nomeadamente. O coeficiente de saturação, a absorção de água por capilaridade, a porosidade, a distribuição da dimensão dos poros e a resistência mecânica são exemplos de indicadores utilizados em alguns destes modelos [12-14].

O método adotado no presente estudo para estimar a resistência das variedade pétreas à cristalização de sais foi proposto por Yu e Oguchi [14]. Este método consiste na definição de um índice de suscetibilidade aos sais (ISS), que varia entre 0 e 20, estabelecido considerando como parâmetros críticos<sup>1</sup>os valores de porosidade aberta e do volume de poros com dimensões inferiores a 0,1  $\mu\text{m}$  e 5  $\mu\text{m}$ . Valores  $\text{ISS} < 1$  indicam que a pedra é exceccionalmente resistente e  $\text{ISS} > 15$  indicam que a pedra é exceccionalmente vulnerável à acção da cristalização de sais.

De acordo com este método, todas as variedades pétreas em estudo são consideradas vulneráveis aos sais ( $4 \leq \text{ISS} < 10$ ), à exepção do Grés de Silves que é considerado resistente aos sais ( $2 \leq \text{ISS} < 4$ ).

Os calcários, apesar de classificados como vulneráveis aos sais, têm ISS diferentes, o Rosal AR por ser menos poroso que a “Pedra de Ançã” PM e PE e por apresentar uma dimensão de poros superior ao PB, é o calcário estudado com a menor suscetibilidade aos sais.

Tabela 4: Susceptibilidade à degradação de acordo com o índice de suscetibilidade aos sais (ISS) [14] e o ensaio de determinação de resistência ao gelo [5-7]

		Cristalização de Sais		Gelo-degelo	
		ISS	Classe	Número de ciclos	Perda de massa (%)
“Pedra de Ançã”	PB	7.8	vulnerável	70	0.35±0.14
	PI	7.9	vulnerável	1	0.02±0.01
	PE	8.8	vulnerável	n.d.	n.d.
Rosal AR		6.8	vulnerável	25	0.18±0.02
Grés de Silves		2.5	resistente	62	0.09±0.05

<sup>1</sup> Metodologia detalhada para o cálculo do ISS em [14].

**Gelo-degelo (baseado em resultados experimentais).** A avaliação relativa da suscetibilidade das variedades pétreas à acção do gelo foi obtida com recurso a um ensaio de ciclos gelo-degelo, baseado no disposto na EN 12731 e de acordo com o procedimento descrito em [6, 7]. O número de ciclos que as variedades pétreas suportam antes da sua integridade estar comprometida é utilizada como indicador da sua durabilidade relativa (integridade avaliada com base em inspeção visual de acordo com EN 12731).

Ao contrário do que acontece para a sua vulnerabilidade à cristalização de sais, as variedades de “Pedra de Ançã” revelam resistência aos ciclos gelo-degelo muito distintas, tendo a variedade menos porosa (PB) e mais resistente suportado um elevado número de ciclos antes do seu colapso quando comparado com a variedade PI, que apenas resistiu a 1 ciclo. Esta variedade (PI) suportou inclusivamente um maior número de ciclos que o Grés de Silves, apesar do último ser resistente à cristalização de sais de acordo com o ISS. As variedades apresentam diferentes susceptibilidades à degradação em função do mecanismo/acção envolvida.

## Conclusão

Identificaram-se diversas anomalias que colocam em risco o significado cultural, histórico e estético dos monumentos construídos com “Pedra de Ançã” e Grés de Silves:

- Perda de massa na forma de desagregação granular (pulverização na Pedra de Ançã), escamação e alveolização;
- Colonização biológica;
- Graffitis.

Estas anomalias, ou a sua gravidade, são resultado da combinação das propriedades físicas e mecânicas destas variedades pétreas. Globalmente, são duas variedades pétreas muito porosas, de baixa resistência mecânica e com elevada capacidade para absorver e transportar água por forças capilares. Quando comparadas com os padrões e os valores de referência utilizados actualmente pelo sector da construção para pedras naturais, verifica-se que apresentam características pouco desejáveis à maioria das aplicações e é expectável um fraco desempenho face aos mais comuns mecanismos de degradação quando comparado com outras variedades pétreas actualmente em exploração.

Muito embora a combinação de propriedades mineralógicas, físicas e mecânicas seja de alguma forma interdependentes, contudo a análise individual de uma ou duas propriedades mostrou ser insuficiente para a determinação correcta da susceptibilidade à degradação uma vez que não existe sempre uma correlação directa entre elas e que esta depende da soma dos seus efeitos.

As variedades pétreas em apreço e os seus comportamentos distinguem-se pelas suas diferentes dimensões médias de poros. A “Pedra de Ançã” por ter poros de menores dimensões em relação ao Grés de Silves, é mais vulnerável à cristalização de sais. O Grés de Silves é resistente à cristalização de sais, no entanto, a presença de argilas pode resultar em fenómenos de degradação por processos não avaliados no presente artigo.

Face às anomalias e mecanismos de degradação mais comuns e às propriedades dos materiais pétreos analisadas no presente artigo, a sua consolidação poderá ser recomendada em algumas circunstâncias, como já estudado anteriormente no caso da “Pedra de Ançã” (e.g.[15, 16]), assim como a sua protecção. Estas acções podem vir a ser consideradas isoladamente, realizadas sequencialmente ou recorrendo à aplicação de um tratamento multi-acção. Especificamente, um tratamento multi-acção que permita não só evitar mais perdas de massa por desagregação granular/pulverização através do incremento de coesão das partículas já soltas (consolidação) mas que também permita proteger as superfícies, minimizando a penetração de água e transporte de sais no interior do espaço poroso, reduzindo a sua bioreceptividade e tornando menos arriscada a remoção de graffitis.

Em todo o caso, é necessário ter em consideração que as situações que requerem intervenções envolvem um conjunto de factores intrínsecos/extrínsecos e, portanto, todos devem ser independentemente analisados antes de qualquer tomada de decisão/acção. Uma vez que se trata de

superfícies com valor cultural e estético, todas as medida e/ou produtos deverão ser também amplamente escortinados antes da sua aplicação uma vez que podem promover efeitos negativos, como alteração significativa de cor, ou acelerar processos de degradação a longo prazo.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento do projeto *GreenMAP - Green multi-action products for the sustainable conservation of historic porous building stones* - (PTDC/ECI-EGC/2519/2020), do CQE (UIDB/00100/2020, UIDP/00100/2020 e LA/P/0056/2020) e CERIS (UID/ECI/04625/2019) e à Camara Municipal de Silves e Direção Geral do Património Cultural pela colaboração. O autor B. Sena da Fonseca agradece à FCT o apoio individual 2020.04185.CEECIND.

## Referências

- [1] Leite, M. and A. Casal Moura., *Rochas Ornamentais Portuguesas*. [cited 2022 26-08-2022]; Available from: <https://rop.lneg.pt/rop/FormTipo.php>.
- [2] Delgado Rodrigues, J., *As pedras de Coimbra. Aspectos relativos à sua degradação e conservação*, in Conf. Int. “A imagem dos centros históricos – bases para a sua salvaguarda”. 2005: Coimbra. p. 9.
- [3] Ribeiro, R., *Pedra de Ançã: Contribuição para a classificação "Global Heritage Stone Resource"*. 2017, Universidade de Coimbra -MsC Thesis.
- [4] Aires-Bairros, L., *As rochas dos monumentos portugueses: tipologiaas e patologias*. Vol. II. 2001.
- [5] Santos, C., *Grés De Silves presente no património construído: Caracterização, suscetibilidade à degradação e estudo de tratamentos de consolidação*. 2021, Universidade de Lisboa: Instituto Superior Tecnico. p. 78.
- [6] Sena da Fonseca, B., *et al.*, *The role of properties on the decay susceptibility and conservation issues of soft limestones: Contribution of Ançã stone (Portugal)*. *Journal of Building Engineering*, 44, (2021) 102997.
- [7] Sena da Fonseca, B., *et al.*, *Artificial aging route for assessing the potential efficacy of consolidation treatments applied to porous carbonate stones*. *Materials & Design*, 120 (2017) 10-21.
- [8] Sena da Fonseca, B., *et al.*, *Effect of the pore network and mineralogy of stones on the behavior of alkoxysilane-based consolidants*. *Construction and Building Materials*, 345, (2022) 128383.
- [9] Delgado Rodrigues, J., *Proposed geotechnical classification of carbonate rocks based on Portuguese and Algerian examples*. *Engineering Geology*, 25(1), (1988) 33-43.
- [10] Sena da Fonseca, B., *et al.*, *Non-destructive and on site method to assess the air-permeability in dimension stones and its relationship with other transport-related properties*. *Materials and Structures*, 48(11), (2015) 3795-3809.
- [11] Pinto, A., *et al.*, *Manual da pedra natural para arquitectura*. 2006: Direcção-Geral de Geologia e Energia. 199.
- [12] Benavente, D., *et al.*, *Durability estimation of porous building stones from pore structure and strength*. *Engineering Geology*, 74(1), (2004) 113-127.

- [13] Galanaki, N., *et al.*, *Accelerated ageing tests of sodium chloride for the evaluation of stones durability to salt crystallization: A comparative study of selected restoration lithotypes*. *Developments in the Built Environment*, 11, (2022) 100081.
- [14] Yu, S. and C.T. Oguchi, *Role of pore size distribution in salt uptake, damage, and predicting salt susceptibility of eight types of Japanese building stones*. *Engineering Geology*, 115(3), (2010) 226-236.
- [15] Delgado Rodrigues, J. and A.P. Ferreira Pinto, *Consolidação de calcários muito porosos, problemas e perspectivas de solução*. *Geonomos*, 24(2), (2016) 202-208.
- [16] Ferreira Pinto, A.P. and J. Delgado Rodrigues, *Consolidation of carbonate stones: influence of treating procedures on the strengthening action of consolidants*. *Journal of Cultural Heritage*, 13(2), (2012) 154-166.

## Conservação de pedras porosas presentes no património com produto multi-ação

RUCHA M.<sup>1, a</sup>, MÈGRE S.<sup>2, b</sup>, FONSECA B. Sena da<sup>3, c</sup>, PIÇARRA S.<sup>1, 3, d</sup>,  
PINTO A.P. Ferreira<sup>2, e</sup>

<sup>1</sup> Escola Superior de Tecnologia do Barreiro, Instituto Politécnico de Setúbal, Lavradio 2839-001, Portugal

<sup>2</sup>CERIS, Departamento de Engenharia Civil, Arquitetura e Georecursos, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa 1049-001, Portugal

<sup>3</sup>Centro de Química Estrutural-CQE, Institute of Molecular Sciences, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa 1049-001, Portugal

<sup>a</sup>madalena.rucha@estbarreiro.ips.pt, <sup>b</sup>sofia.megre@tecnico.ulisboa.pt,

<sup>c</sup>bruno.fonseca@tecnico.ulisboa.pt, <sup>d</sup>susana.picarra@estbarreiro.ips.pt, <sup>e</sup>anapinto@civil.ist.utl.pt

**Palavras-chave:** Pedra Porosas, Produto Multi-ação, Consolidante-Hidrofóbico, Eficácia, Compatibilidade.

**Resumo.** O património cultural em pedra integra frequentemente variedades com elevada porosidade, a qual é uma das responsáveis pela sua elevada suscetibilidade à degradação e pela necessidade de executar intervenções de conservação com o objetivo de preservar os valores associados. A sua conservação envolve frequentemente uma ampla diversidade de ações e produtos (hidrófugos, biocidas, etc.) e por este motivo estão disponíveis no mercado diversas opções que se propõem a desempenhar mais do que uma ação ou função, nomeadamente, ação de consolidação e de proteção. Estes produtos têm sido desenvolvidos para serem aplicados e eficazes numa ampla variedade de suportes (ex. betão, tijolo, argamassa, materiais pétreos, etc.). A investigação apresentada tem como objetivo estudar a potencial eficácia e compatibilidade de um produto multi-ação comercial, com ação consolidante e hidrofóbica, aplicado em duas variedades pétreas porosas com presença importante em monumentos portugueses, nomeadamente, um calcário e um arenito de elevada porosidade, mas com diferentes naturezas mineralógicas. O estudo envolve uma campanha experimental em laboratório que pretende avaliar a potencial eficácia da ação consolidante recorrendo a ensaios mecânicos e a ação hidrofóbica recorrendo à determinação do ângulo de contacto de gotas de água. A potencial compatibilidade é avaliada com base nas alterações de cor, permeabilidade ao vapor de água e cinética de secagem. Os tratamentos com o produto multi-ação revelaram-se potencialmente eficazes em ambas as pedras para a ação de consolidação assim como para a ação hidrofóbica tendo-se, no entanto, verificado um maior incremento de coesão no Grés de Silves. As alterações globais registadas na cor, permeabilidade ao vapor de água e/ou cinética de secagem nas duas pedras indiciam potenciais riscos de incompatibilidade entre os tratamentos e ambas as variedades pétreas.

### Introdução

O recurso a variedades pétreas porosas foi frequente na construção de edifícios monumentais, fortificações e elementos decorativos com elevado valor artístico, histórico, social, cultural e económico, tais como o Castelo de Silves, a Sé de Silves [1], a Porta Especiosa da Sé Velha de Coimbra e Igreja de Santa Cruz em Coimbra [2, 3].

A elevada porosidade e elevada capacidade para absorver e reter água de alguns arenitos e calcários são fatores que conduzem a uma elevada suscetibilidade à degradação, que se pode manifestar sob diversas formas e ser responsável pela redução do valor dos objetos onde ocorrem [4]. Nestas variedades é frequente a presença de biocolonização, assim como formas de degradação do tipo pulverulência, arenização, alveolização, entre outras [3, 5], que promovem uma redução de coesão e justificam a necessidade de intervir.

A diversidade de intervenções que podem estar em causa obriga ao recurso de diferentes ações de conservação e a produtos com funções específicas, por exemplo, consolidação, proteção e limpeza, entre outras [6]. Independentemente da sua natureza, qualquer intervenção em objetos com significado cultural deve ser orientados pelos princípios da conservação e do restauro: autenticidade, intervenção mínima, compatibilidade, entre outros [7].

As ações de consolidação pretendem restabelecer a coesão entre as partículas do material pétreo degradado sujeito a perdas contínuas de massa, independentemente da sua natureza [8]. Esta ação apresenta um elevado risco de insucesso e de desenvolver novos e mais severos processos de degradação [9]. Por outro lado, as ações de proteção podem ter como objetivo a redução da interação do material com a água, para prevenir fenómenos de degradação associados [10], assim como a proteção a outras ações nocivas, como atos de vandalismo, nomeadamente, graffiti. Em particular, a proteção face à presença da água pode ser conferida com a aplicação de produtos com ação hidrofóbica, baseados em alcóxissilanos [6, 11] ou noutros tipos de moléculas [12].

Atualmente, o mercado disponibiliza alguns produtos que têm sido desenvolvidos com o intuito de serem aplicáveis e eficazes numa ampla variedade de suportes (ex. betão, tijolo, argamassa, materiais pétreos, etc.) [13] e que se apresentam como aptos a serem utilizados com mais do que uma função (produto multi-ação), nomeadamente, produtos com ação de consolidante e de proteção.

O recurso a produtos multi-ação para intervenções de conservação permite que as necessidades de conservação identificadas à priori sejam obtidas de forma simultânea no âmbito de uma única intervenção, com a conseqüente redução do risco do insucesso da aplicação de diversos produtos isoladamente e dos recursos humanos e materiais para a sua concretização.

Antes de qualquer tomada de decisão definitiva é assim necessário avaliar se a aplicação de um determinado produto desempenha as ações para as quais foi desenvolvido no material pétreo em questão, bem como perceber se apresenta riscos de ser incompatível, i.e., se pode originar ou potenciar alterações nocivas à correta apreciação do objeto e à sua preservação a médio/longo prazo.[7]

O presente artigo tem como objetivo contribuir para o estudo da potencial eficácia inicial e compatibilidade da aplicação de um produto multi-ação comercial, com ação de consolidação e hidrofóbica, em duas variedades pétreas de elevada porosidade (calcário e arenito) presentes no património construído português: Grés de Silves e a Pedra de Ançã. Estas variedades apresentam diversos padrões de degradação, alguns dos quais suscetíveis de serem abordados com recurso a um tratamento com estas ações [14]. Pretende-se deste modo incrementar o conhecimento disponível relativo ao seu potencial de aplicabilidade no património construído que integra estas variedades pétreas.

## **Materiais e métodos**

**Variedades pétreas.** O desempenho do produto multi-ação foi avaliado em duas pedras históricas portuguesas, o Grés de Silves (Figura 1 - a)) e uma variedade de “Pedra de Ançã” (Figura 1 - b)).

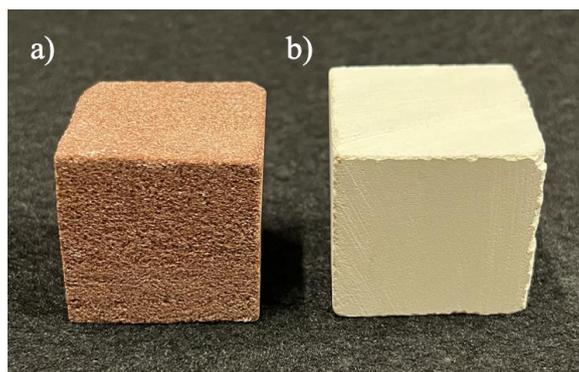


Figura 1: Grés de Silves (a) e Pedra de Ançã (b)

As variedades habitualmente designadas como "Pedra de Ançã" possuem tipicamente cor clara e são homogéneas, podendo apresentar valores de porosidade diversos [15]. A variedade de "Pedra de Ançã" utilizada no estudo apresenta porosidade em torno dos 20%.

O Grés de Silves utilizado possui porosidade em torno dos 23% e propriedades físicas comparáveis com as avaliadas em amostras recolhidas de blocos presentes em monumentos de Silves [1].

As variedades estudadas são mineralogicamente distintas. A Pedra de Ançã é principalmente composta por calcite (carbonato de cálcio) registando uma presença reduzida de quartzo. O Grés de Sives é constituído por quartzo, feldspato, minerais argilosos e hematite em quantidades reduzidas [14].

**Produto multi-ação e procedimento de aplicação.** Na campanha experimental em laboratório foi utilizado um produto multi-ação comercial, com ação consolidante e propriedades hidrofóbicas, o ESTEL 1100 (C.T.S. s.r.l., Itália). Este produto foi selecionado porque a sua ficha técnica refere que é adequado para o tratamento de pedras siliciosas e carbonatadas de elevada porosidade [16]. O ESTEL 1100 é um produto à base de silicato de etilo e polissiloxanos oligoméricos, em solução de White Spirit D40, incolor, e pronto a utilizar. Após reagir com a humidade do ar, origina sílica gel que é a responsável pela ação consolidante deste produto. A ação hidrofóbica é obtida através da presença de polissiloxanos.

A ficha técnica do ESTEL 1100 refere que a sua aplicação não causa alterações no aspeto exterior dos materiais tratados, tais como a formação de manchas ou películas brilhantes, e permite que o material tratado seja permeável ao vapor de água [16].

Para a aplicação do ESTEL 1100, os provetes foram previamente secos em estufa a 45°C e estabilizados em ambiente laboratorial durante 24 horas com o objetivo de assegurar que apresentavam as condições de equilíbrio termo-higrométricas do ambiente de aplicação.

Com base em estudos anteriores [17, 18] e de forma a permitir uma ação consolidante em profundidade e uma distribuição homogénea, a aplicação do produto ESTEL 1100 foi realizada por absorção capilar durante 3 horas (Figura 2).

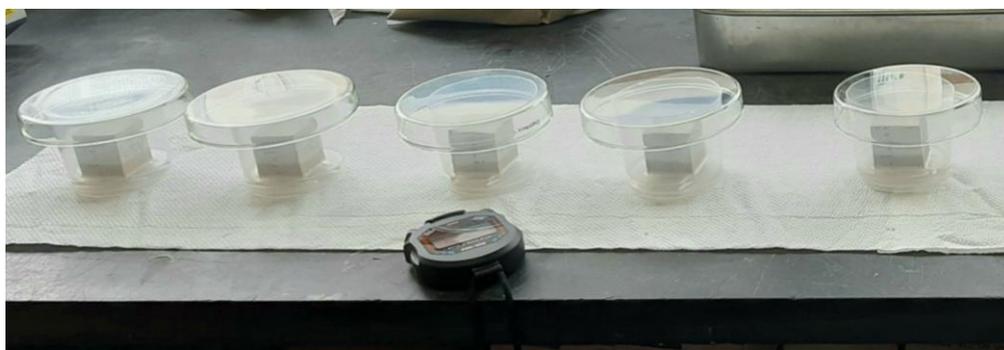


Figura 2: Aplicação do ESTEL 1100 por absorção capilar

No decurso da aplicação foi registada periodicamente a evolução da franja capilar nas faces laterais dos provetes. Após as 3 horas de aplicação, procedeu-se à determinação da quantidade de produto absorvido através da Equação 1.

$$\text{Produto absorvido} = \frac{m_f - m_i}{s} \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (1)$$

Onde:

$m_i$  – massa do provete antes da aplicação [kg];

$m_f$  – massa do provete imediatamente após a aplicação [kg];

$S$  – área do provete em contacto com o produto [m<sup>2</sup>].

De modo a evitar a formação de crostas superficiais, resultantes da migração da matéria ativa associada à evaporação da componente mais volátil do produto, as faces dos provetes foram isoladas com recurso a *parafilm* e assim permaneceram durante 48 horas.

**Descrição dos ensaios.** O estudo da potencial eficácia dos tratamentos realizados inclui a avaliação da ação consolidante e hidrofóbica, uma vez que resultam da aplicação de um produto que integra estas duas ações.

A potencial eficácia da ação consolidante foi estudada através da resistência à furação, que permite avaliar o incremento de coesão e a distribuição da ação consolidante em profundidade [19]. Os ensaios de furação tiveram início com a realização de um furo guia de 3 mm de diâmetro sobre o qual foram realizados os ensaios de caracterização recorrendo a uma broca de 5 mm de diâmetro, alinhada com o furo guia. Todos os ensaios de furação foram realizados com uma velocidade de rotação de 100 rotações por minuto e uma taxa de penetração de 20 mm por minuto. Nestas condições de ensaio o valor médio obtido para a resistência à furação da Pedra de Ançã foi de cerca de 12 N e do Grés de Silves de cerca de 11 N.

A avaliação da potencial eficácia da ação hidrofóbica incluiu a determinação do ângulo de contacto estático de gotas de água (os ângulos de contacto entre as gotas e as superfícies dos provetes foram calculados segundo o modelo de ajuste de Young-Laplace por um software específico).

A avaliação da potencial compatibilidade dos tratamentos estudados foi efetuada recorrendo à análise das alterações de cor, permeabilidade ao vapor de água e cinética de secagem. A avaliação da potencial compatibilidade incluiu também a análise da tendência para a formação de crostas superficiais endurecidas promovidas pelos tratamentos.

O estudo das alterações de cor consistiu na avaliação quantitativa da cor das superfícies que estiveram em contacto com o produto, antes (R- referencia) e após tratamento (T – tratado), recorrendo a um espectro colorímetro KangGuang WSD-3A, Figura 3 – a). Para tal, procedeu-se à determinação das coordenadas cromáticas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ , no sistema CIELAB, em que a coordenada  $L^*$  representa a luminosidade da cor (preto - 0; branco -100),  $a^*$  é a coordenada que reflete o teor de vermelho e verde (vermelho (+ $a^*$ ); verde (- $a^*$ )) e  $b^*$  a coordenada que depende do teor em amarelo e azul (amarelo (+ $b^*$ ) e o azul (- $b^*$ )).

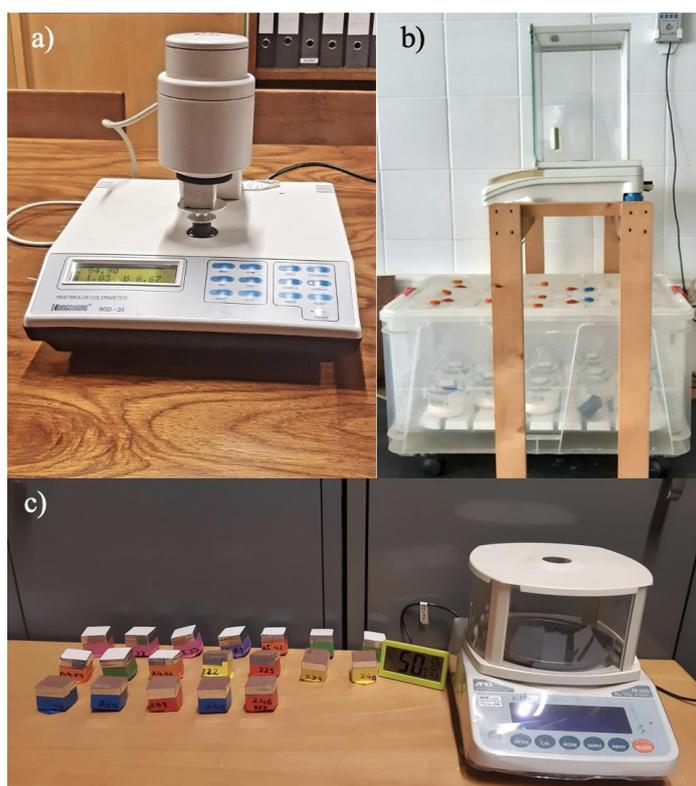


Figura 3: Caracterização colorimétrica a), Ensaio de permeabilidade ao vapor de água b), Ensaio de secagem c)

A determinação das coordenadas  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$  permitem calcular a saturação da cor ( $C^*$ ), através da Equação 2, assim como a variação total de cor promovida pelos tratamentos ( $\Delta E^*$ ), através da Equação 3, na qual  $\Delta L^* = L_R^* - L_T^*$ ,  $\Delta a^* = a_R^* - a_T^*$  e  $\Delta b^* = b_R^* - b_T^*$ , correspondem à variação dos valores das coordenadas cromáticas antes (R) e após tratamento (T).

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (2)$$

$$\Delta E^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad (3)$$

A determinação da permeabilidade ao vapor de água e da cinética de secagem foram realizadas recorrendo a procedimentos experimentais (Figura 3 – b, c) baseados no disposto nas recomendações RILEM 25-PEM [20].

A avaliação da tendência de formação de crostas superficiais endurecidas pelos tratamentos nas variedades pétreas foi efetuada recorrendo à análise da distribuição dos valores de força em profundidade nas pedras tratadas.

## Resultados e discussão

**Tratamentos.** A evolução da franja líquida do ESTEL 1100 resultante da absorção do produto durante 3 horas, Tabela 1, permite verificar que, embora as pedras em estudo possuam valores de porosidade similares, a franja líquida evoluiu mais rapidamente nos provetes de Grés de Silves do que nos provetes de Pedra de Ançã, assim como atingiu o topo dos provetes de Grés de Silves ao fim de 1 hora, enquanto que na Pedra de Ançã esta franja líquida apenas atingiu uma profundidade da ordem de 21 mm ao fim de 3 horas.

Os valores de penetração obtidos em ambos os tratamentos estudados apontam para que o produto ESTEL 1100 tenha capacidade de penetração para a consolidação das pedras em estudo, uma vez que tratamentos que promovam mais de 20 mm de penetração são habitualmente considerados como possuindo capacidade de penetração promissora no âmbito da consolidação da pedra [20].

Tabela 1: Evolução da franja líquida do ESTEL 1110 - Valor médio  $\pm$  desvio padrão [mm] ( $n_{\text{provetes}}=8$ )

Pedra	Tempo [minutos]										
	0	5	10	15	20	30	60	90	120	150	180
Grés de Silves	3,0 $\pm$ 0,0	15,9 $\pm$ 1,5	19,3 $\pm$ 1,4	23,2 $\pm$ 1,3	27,6 $\pm$ 1,7	29,6 $\pm$ 1,1	30,0 $\pm$ 0,0				
Pedra de Ançã	3,0 $\pm$ 0,0	5,9 $\pm$ 0,7	7,0 $\pm$ 0,4	7,6 $\pm$ 0,3	8,4 $\pm$ 0,5	9,6 $\pm$ 0,6	13,3 $\pm$ 0,7	15,2 $\pm$ 0,7	17,2 $\pm$ 1,1	19,2 $\pm$ 1,1	20,9 $\pm$ 1,5

Os tratamentos efetuados originaram quantidades de produtos absorvido de  $4,0 \pm 0,1$  kg/m<sup>2</sup> e  $3,3 \pm 0,4$  kg/m<sup>2</sup> no Grés de Silves e na Pedra de Ançã, respetivamente. A menor quantidade de produto absorvida pela Pedra de Ançã resulta essencialmente da menor capacidade de penetração manifestada pelo ESTEL 110 nesta pedra, face ao registado no Grés de Silves.

### Potencial eficácia.

- Ação consolidante

A eficácia da ação consolidante avaliada através da determinação da resistência à furação permitiu verificar que o produto multi-ação é potencialmente eficaz para ambas as pedras, uma vez que ocorreu um incremento na resistência à furação relativamente homogéneo em toda a profundidade dos provetes. Os valores de resistência à furação característicos de ambas as pedras sofreram incrementos na ordem dos 80% para o Grés de Silves e de 25% para a Pedra de Ançã, o que indica que o produto em causa apresenta uma maior capacidade para tratar o Grés de Silves.

- Ação hidrofóbica

A eficácia da ação hidrofóbica foi avaliada através da medição do ângulo de contacto estático da gota de água quando em contacto com a superfície das pedras. Após a aplicação do produto, as superfícies de ambas as variedades pétreas tornaram-se hidrofóbicas uma vez que os ângulos determinados foram de aproximadamente 120° em ambos os casos e, portanto, superiores a 90°.

**Potencial compatibilidade.** Em ambas as pedras tratadas, os perfis de resistência à furação em profundidade mostraram um incremento de resistência relativamente homogêneo ao longo da totalidade da profundidade dos provetes tratados, assim não se identificou a presença de estratos superficiais endurecidos, sendo um indicador positivo quanto ao potencial de compatibilidade.

Por outro lado, os tratamentos estudados promoveram a redução da permeabilidade ao vapor de água e da cinética de secagem das pedras, que se manifestou de forma mais significativa na Pedra de Ançã, Tabela 2. Alterações que de alguma forma devem ser consideradas de forma cuidadosa, principalmente no que diz respeito à Pedra de Ançã, no âmbito de processos de seleção de tratamentos, na medida em que indiciam a existência de um potencial risco de incompatibilidade.

Tabela 2: Alterações das características dos provetes de pedra após a aplicação do ESTEL 1100

	Coefficiente de permeabilidade ao vapor de água [%]*	Índice de secagem [%]*	Diferença total de cor ( $\Delta E^*$ )
Grés de Silves	-24,5	19,6	12,5
Pedra de Ançã	-53,5	294,7	6,9

\* (% da variação =  $\frac{T-R}{T} \times 100$ )

As variações totais de cor promovidas em ambos os suportes foram superiores a 5 (Tabela 2), ou seja, passíveis de serem perceptíveis visualmente [21], sendo estas alterações bastante mais notórias no Grés de Silves. Em ambas as pedras, a aplicação do produto originou um escurecimento (diminuição do valor de L\*: Figura 4 – a)) e amarelecimento (aumento do valor de b\*: Figura 4 – b)) das superfícies tratadas.

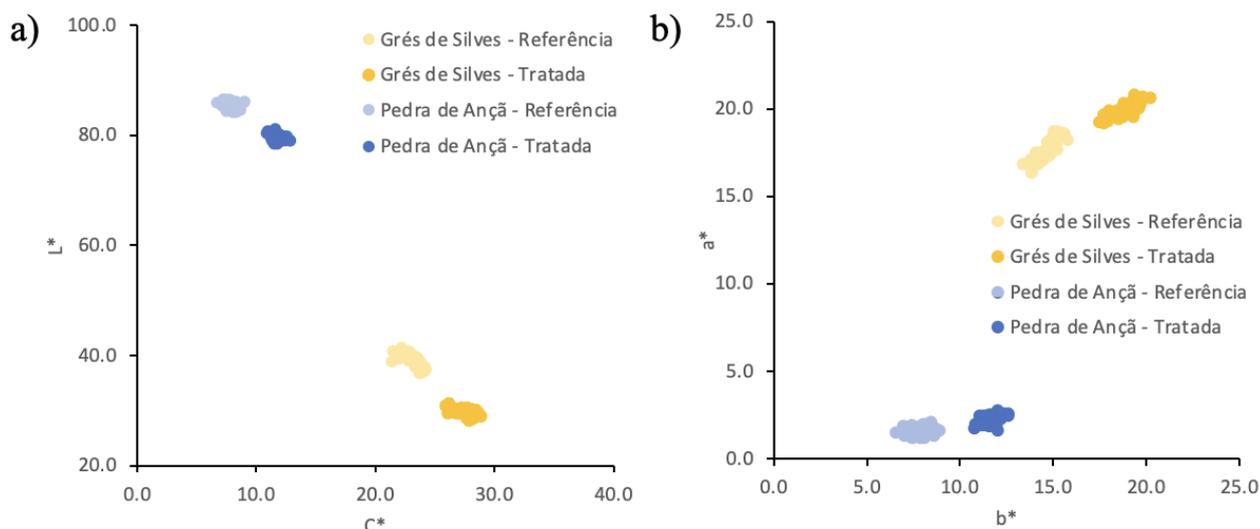


Figura 4: Pedra de Ançã e Grés de Silves alterações de cor: valores das coordenadas colorimétricas L\* e cromas C\* a) e das coordenadas a\* e b\* b)

## Conclusão

A aplicação do produto multi-ação ESTEL 1100 no Grés de Silves e na Pedra de Ançã revelou-se potencialmente globalmente eficaz para a ação de consolidação no que concerne à sua capacidade

de penetração e de incremento de coesão. O tratamento também se revelou potencialmente eficaz no que se refere à ação hidrofóbica, uma vez que permitiu a obtenção de valores de ângulo de contacto superiores a 90°.

As alterações promovidas pelo no âmbito da sua potencial eficácia foram mais significativas quando aplicado no Grés do Silves do que na Pedra de Ançã.

No que se refere aos parâmetros considerados na avaliação da potencial compatibilidade, e com exceção das variações de cor, as alterações promovidas pelo tratamento revelaram menor risco de incompatibilidade potencial no Grés de Silves face ao registado na Pedra de Ançã. O ESTEL 1100 promoveu alterações de cor perceptíveis visualmente, particularmente mais relevantes quando aplicado no Grés de Silves.

O estudo desenvolvido e os resultados obtidos permitiram incrementar o conhecimento da potencial eficácia e compatibilidade de um produto multi-ação, com função consolidante e hidrofóbica, em variedades pétreas porosas com presença importante no património português, assim como evidenciaram o interesse do aprofundamento do seu estudo.

### Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT) pelo financiamento do projeto *GreenMAP - Green multi-action products for the sustainable conservation of historic porous building stones* - (PTDC/ECI-EGC/2519/2020), do CQE (UIDB/00100/2020, UIDP/00100/2020 e LA/P/0056/2020) e CERIS (UID/ECI/04625/2019) e à Camara Municipal de Silves e Direção Geral do Património Cultural pela colaboração. O autor B. Sena da Fonseca agradece à FCT o apoio individual 2020.04185.CEECIND.

### Referências

- [1] C. Santos, *Grés de Silves presente no património construído: Caracterização, suscetibilidade à degradação e estudo de tratamentos de consolidação*, Masters dissertation, Ulisboa - Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2021.
- [2] M. Trindade, M. Quinta-Ferreira, and R. Oliveira, *Contribution to the study of Ançã limestone*, (1998) 2945–2952.
- [3] J. Delgado Rodrigues and A. P. Ferreira Pinto, *Stone consolidation by biomineralisation. Contribution for a new conceptual and practical approach to consolidate soft decayed limestones*, *J Cult Herit*, vol. 39, (2019) 82–92, doi: 10.1016/j.culher.2019.04.022.
- [4] E. Doehne and C. A. Prince, *Stone Conservation: An Overview of Current Research* (Second Edition). Getty Publications, 2010.
- [5] A. Turkington and T. Paradise, “Sandstone weathering: a century of research and innovation,” *Geomorphology*, vol. 67, (2005) 229–253.
- [6] F. Gherardi, *Current and Future Trends in Protective Treatments for Stone Heritage*, in *Conserving Stone Heritage: Traditional and Innovative Materials and Techniques*, P. N. Gherardi Francesca and Maravelaki, Ed. Cham: Springer International Publishing, (2022) 137–176, doi: 10.1007/978-3-030-82942-1\_5.
- [7] ICOMOS, *ICOMOS Charter- Principles for the Analysis, Conservation and Structural Restoration of Architectural Heritage*, in *ICOMOS 14th General Assembly in Victoria Falls*, Oct. 2003, p. 4.
- [8] A. P. F. Pinto and J. D. Rodrigues, *Stone consolidation: The role of treatment procedures*, *J Cult Herit*, vol. 9, no. 1, (2008) 38–53, doi: 10.1016/j.culher.2007.06.004.

- [9] J. Delgado Rodrigues, Stone Consolidation. Between Science and Practice. Francesca Gherardi e Pagona Noni Maravelaki (eds), *Conserving Stone Heritage: Traditional and Innovative Materials and Techniques*, Springer, in *Conserving Stone: Heritage Traditional and Innovative Materials and Techniques*, F. Gherardi and P. Noni Maravelaki, Eds. Cultural Heritage Science, Springer, (2022) 101–136.
- [10] I. Karapanagiotis and P. N. Manoudis, *Superhydrophobic and superamphiphobic materials for the conservation of natural stone: An overview*, *Construction and Building Materials*, vol. 320. Elsevier Ltd, (2022) 21, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126175.
- [11] D. Aslanidou, I. Karapanagiotis, and D. Lampakis, *Waterborne superhydrophobic and superoleophobic coatings for the protection of marble and sandstone*, *Materials*, (2018) vol. 11, no. 4, doi: 10.3390/ma11040585.
- [12] I. Karapanagiotis and M. Hosseini, *Superhydrophobic coatings for the protection of natural stone*, in *Advanced Materials for the Conservation of Stone*, Springer International Publishing, (2018) 1–25, doi: 10.1007/978-3-319-72260-3\_1.
- [13] P. N. Maravelaki, K. Kapetanaki, and D. Stefanakis, *TEOS-PDMS-calcium oxalate hydrophobic nanocomposite for protection and stone consolidation*, *Heritage*, vol. 4, no. 4, (2021) 4068–4075, doi: 10.3390/heritage4040224.
- [14] B. Sena da Fonseca, A.P. Ferreira Pinto, S. Piçarra, and M.F. Montemor, *Propriedades e degradação de duas pedras muito porosas com expressão no património português*, 2022.
- [15] B. Sena da Fonseca, A. P. Ferreira Pinto, A. Rodrigues, S. Piçarra, and M. F. Montemor, *The role of properties on the decay susceptibility and conservation issues of soft limestones: Contribution of Ançã stone (Portugal)*, *Journal of Building Engineering*, (2021) vol. 44, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102997.
- [16] C.T.S. s.r.l., *Technical data sheet for ESTEL 1100*, 2015.
- [17] B. Sena da Fonseca, A. P. Ferreira Pinto, S. Piçarra, and M. F. Montemor, *Alkoxysilane-based sols for consolidation of carbonate stones: Proposal of methodology to support the design and development of new consolidants*, *J Cult Herit*, vol. 43, (2020) 51–63, doi: <https://doi.org/10.1016/j.culher.2019.11.003>.
- [18] A.P. Ferreira Pinto, *Conservação de Pedras Carbonatadas. Estudo e Selecção de Tratamentos*, Doctoral Dissertation, UTLisboa – Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2002.
- [19] G. M. C. Gemelli, R. Zarzuela, F. Fernandez, and M. J. Mosquera, *Compatibility, effectiveness and susceptibility to degradation of alkoxysilane-based consolidation treatments on a carbonate stone*, *Journal of Building Engineering*, (2021) vol. 42, doi: 10.1016/j.jobe.2021.102840.
- [20] J. D. Rodrigues and A. Grossi, *Indicators and ratings for the compatibility assessment of conservation actions*, *J Cult Herit*, vol. 8, no. 1, (2007) 32–43, doi: 10.1016/j.culher.2006.04.007.
- [21] R. Sasse, *Engineering Aspects of Monument Preservation*, vol. 2, (2001) 197–216.

---

# CAPÍTULO 8

---

CASOS DE ESTUDO

## Construction project risk management as key to enhanced lifecycle management of constructed assets

ALMEIDA Nuno Marques de<sup>1,a</sup>

<sup>1</sup>Instituto Superior Técnico, Portugal

<sup>a</sup>nunomarquesalmeida@tenico.ulisboa.pt, nma@porvalor.pt

**Keywords:** Risk Management, Construction Projects, Lifecycle Management, Asset Management.

**Abstract.** Constructed assets such as infrastructure, buildings and industrial facilities consume significant financial resources from public and private budgets, which are necessarily constrained. It is increasingly importance that long-term investments in this type of physical assets are optimized to ensure success and the fulfilment of present and future needs of relevant stakeholders. Organizations responsible for investments in the acquisition or renovation and for the operation and maintenance expenses associated with this type of physical assets, have been progressively adopting asset and risk management principles in view of creating and protecting value and transparently demonstrate optimal lifecycle management decisions. The risk management approach is particularly significant in this context as it can translate into simple terms the impacts arising from the decisions made throughout the entire life cycle of constructed assets. This paper presents a reflection based on empirical evidence collected since 2009 with regards to risk management practices in the pre-construction, construction or post-construction phases of constructed assets. The study covers both less formal and more sophisticated and innovative approaches to managing the life cycle of constructed assets and asset systems, as well as future perspectives for infusing risk-based thinking and an asset management culture in the AECO industry.

### Introduction

Traditionally, the main goal of construction management is to ensure compliance with the required quality levels and occupation safety and health and environmental provisions, within the prescribed schedule and minimizing investment costs. The optimization of these key elements (quality, occupational safety and health, environment, time and cost) is complex, given the interconnection that naturally exists between them, although some elements may be more predominant than others [1].

On the other hand, there is a growing competitiveness among organizations of the AECO industry seeking higher productivity and the satisfaction of multiple stakeholders with regards to sustainability (see Figure 1) and resilience issues [2,3].

The needs and expectations of increasingly demanding stakeholders became conditions to be considered by all organizations in the AECO industry, including those involved in the financing, promotion, design, construction/assembly/manufacturing, operation/use, maintenance and rehabilitation/disposal of constructed assets and asset systems. These organizations are faced with the need to improve their economic, social and environmental performance in an increasingly competitive space. To this end, it is important to efficiently manage the available resources and optimize all aspects of construction project management that have been consensually recognized by the technical and scientific communities [4-7]: Integration, Stakeholders, Scope, Resources, Time, Cost, Risk, Quality, Safety, Environment, Procurement, Communications, Financial, Claims. These aspects of construction project management are listed in Figure 2.

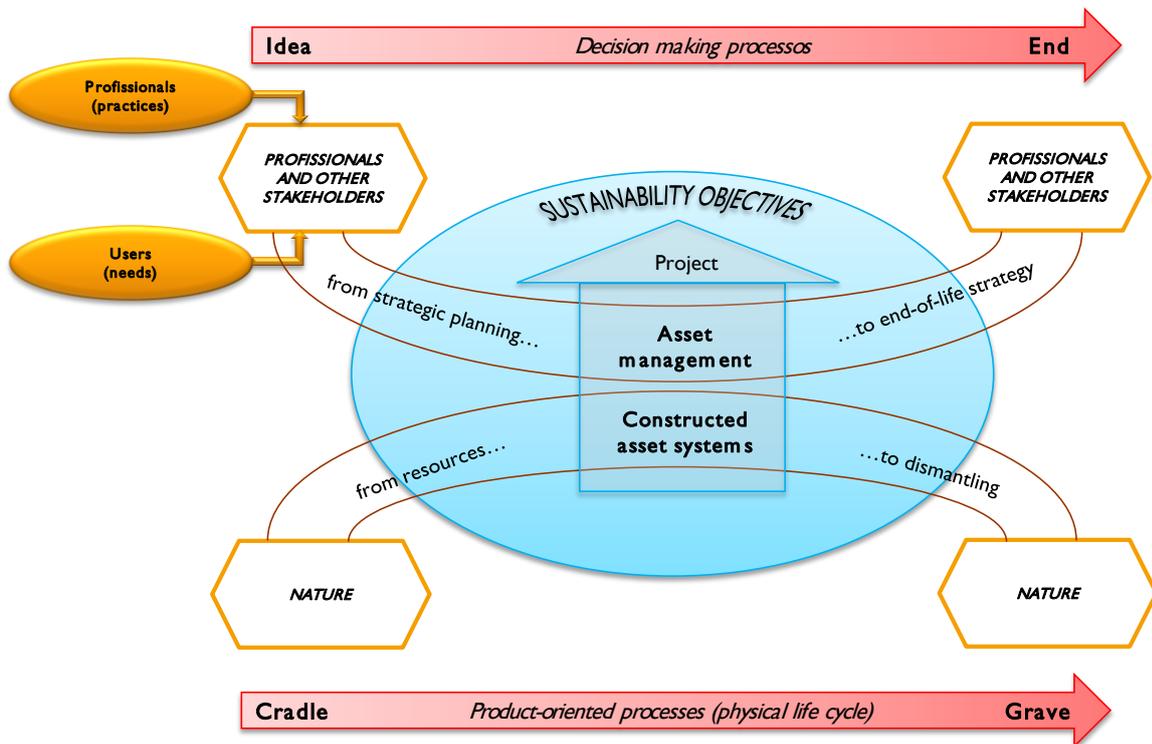


Figure 1: Sustainable management framework for constructed assets (adapted from [1,8])

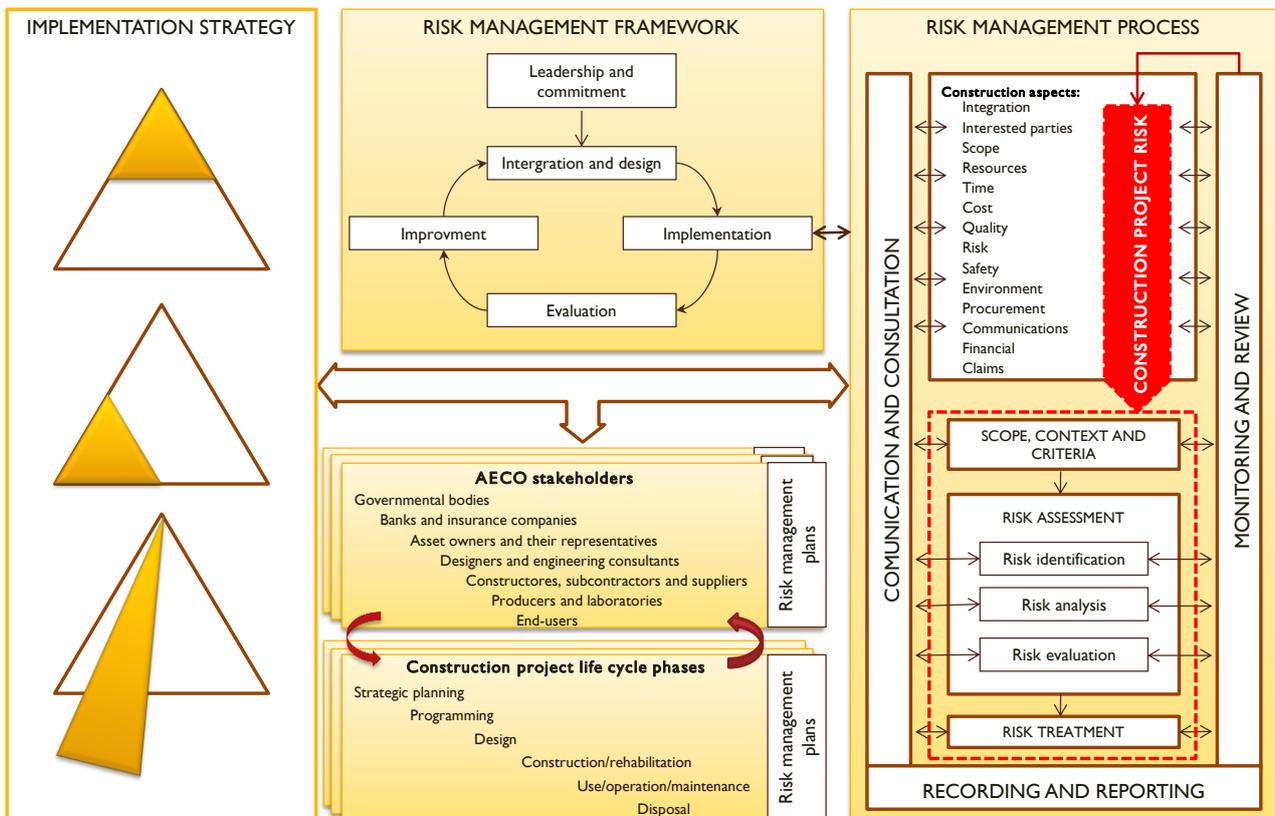


Figure 2: Framework for construction project risk management (adapted from [9])

European regulations on the marketing of construction products and on public procurement emphasize the importance of optimizing and balancing all aspects of construction project management throughout the entire life cycle of the project. But civil engineering projects can span several decades or even centuries. Thus, it is of great relevance to integrate life cycle thinking

through emerging approaches such as asset management, in combination with other management approaches that gained widespread acceptance after the publication of the following international standards on principles, guidelines and requirements for management systems [4-5,10-19]: quality (ISO 9001) , environment (ISO 14001), occupational safety and health (ISO 45001), quality in projects (ISO 10006), risk (ISO 31000), social responsibility (ISO 26000), project management (ISO 21500), asset management (ISO 55001), facility management (ISO 41001) and innovation and entrepreneurship (ISO 56002).

Construction management can and should contribute to revaluing the AECO industry and maximize the value that is derived from the many important investments made in this sector, with due consideration to the whole life cycle of the constructed assets and asset systems resulting from those investments. There is a need to concretely adopt a medium/long-term perspective focused on realizing value from these constructed assets throughout their entire life cycle, in a way that accounts for both the present and future needs and expectations of society in general [20] and the various specific stakeholders of the sector [21], plus the needs for innovations and modernization [22] and the various uncertainties associated with very prolonged asset life cycles.

Construction project risk management can and has been playing a major role in this context. The core principle of risk management is value creation and protection. Thus, the adoption of this management approach by AECO stakeholders, including banks, insurance companies and financial institutions, and the application of well-known state-of-the-art techniques available in the literature [23] that are currently being applied by engineering professional throughout the life cycle of construction projects (see construction project life cycle stages in Figure 2), offer a sound support and a bridge towards full implementation of the asset management approach in the AECO industry.

Figure 3 shows the results for a search on the online database Scopus to systematically retrieve scientific studies including the term “risk management” in the article title, abstract or keywords, published at any time. The authors of this study [24] yielded 137,120 papers in 2021. The distribution of papers by subject area suggests the great relevance of the risk management discipline for Engineering practice in general (see Figure 4), but also within the civil engineering realm.

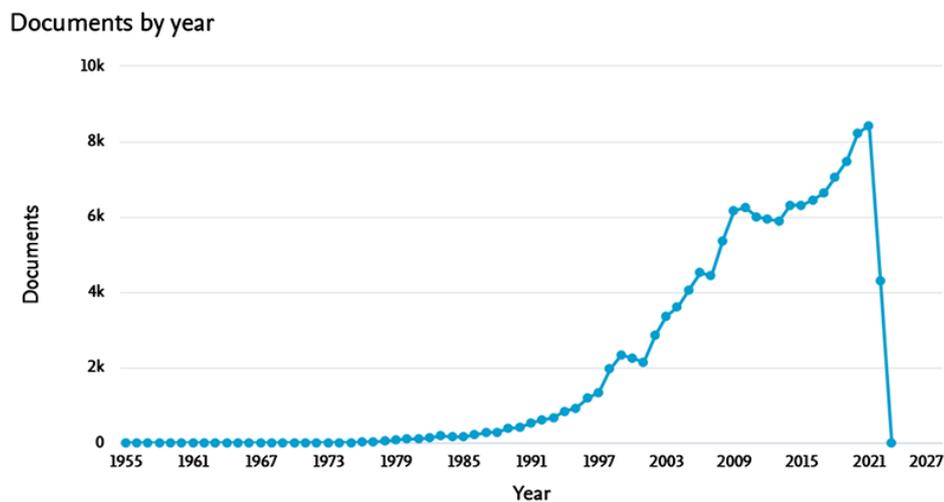


Figure 3: Number of publications about “risk management” [24]

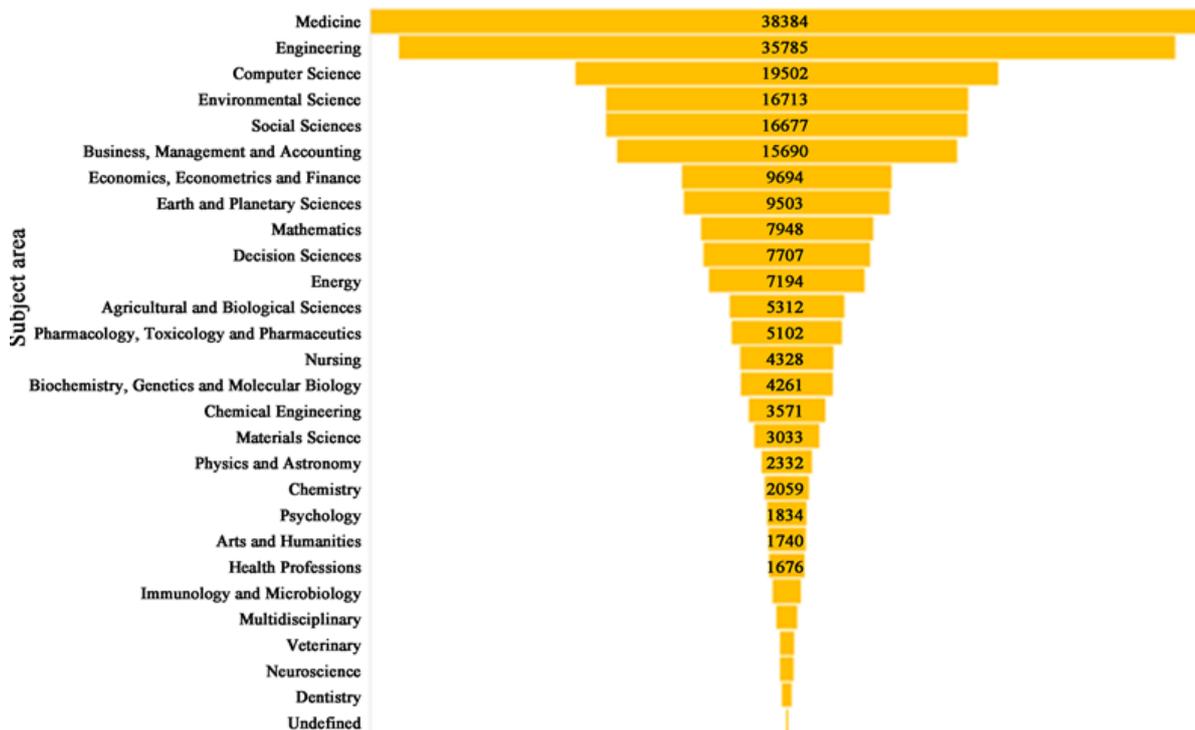


Figure 4: Distribution of publications about “risk management” by subject area [24]

## Method

This paper presents an empirical study of a representative sample of projects, from the Portuguese AECO industry, with formal risk management requirements. Table 1 includes an identification of these projects, the stakeholders that constituted the collaborative ecosystem at the time of the design and development of the risk management approach to the project, plus the role and contributions of the author of this study in these ecosystems. The empirical study involves the analysis of the following parameters (see Figure 2):

- Implementation strategy: top management; specific management unit; integrated.
- Risk management mandate (stakeholders): governmental bodies; banks and insurance companies; asset owners or their representatives; designers and engineering consultants; constructors, subcontractors and suppliers; producers and laboratories; end-users.
- Risk management requirements: framework, process, tools.
- Risk management criteria (construction management aspects): integration; interested parties; scope; resources; time; cost; quality; risk; safety; environment; procurement; communications; financial; claims.
- Life cycle phases: strategic planning; programming; design; construction/rehabilitation; use/operation/maintenance; disposal.

## Results and discussion

Tables 2 to 6 summarize the results of the study.

All projects used a specific management unit to design and develop the risk management strategy (see Table 2). These formal units are often needed when risk management requirements are explicitly stated, due to the overarching and cross-functional nature of the risk management approach. In most projects, top management was actively involved in ensuring that risk management activities across the different areas of concern were complying with risk management requirements, namely that the necessary resources were allocated to managing risks and that these risks and their management status was properly communicated.

Table 1: Sample of construction projects studied

#	Designation	Year	Collaborative ecosystem	Author's role in the ecosystem
1	Knowledge and Innovation Centre for Water and Energy	2022	Asset owner and service providers in the programming stage	Risk management coordinator
2	Road Bridge D. António Francisco dos Santos	2021	Constructor, designer and service providers in the design-build tender stage	Risk manager
3	Construction contract for the Central Hospital of Alentejo	2019-2021	Constructors and service providers in the tender and execution stages	Risk manager Technical opinion expert
4	Bridge over the Douro River and Accesses between Porto (Campo Alegre) and Vila Nova de Gaia (Candal)	2021	Designer and service providers in the tender stage	Risk manager
5	Porto Metro's Circular Line (Praça da Liberdade - Casa da Música section)	2020-2021	Owner, supervision, constructor and service providers in the execution stage	Risk manager
6	Porto Metro's Yellow Line (Santo Ovídio - Vila d'Este section)	2020-2021	Owner, supervision, constructor and service providers in the execution stage	Risk manager
7	Infrastructure risk management of rail and road networks	2020	Asset owner and scientific partners in post-construction stage	Scientific adviser
8	Infrastructure risk management of urban and industrial water systems	2019-2020	Asset owner and scientific partners in post-construction stage	Scientific adviser
9	Drainage tunnels of the city of Lisbon	2019-2020	Constructor, designer and service providers in the design-build tender stage	Risk manager
10	Olivais station of the Lisbon Metro	2018	Constructors and service providers in the tender stage	Risk analyst
11	Corporate risk management strategy and process at Estradas de Portugal	2014-2015	Asset owner and scientific partners in post-construction stage	Risk manager adviser
12	Wastewater Treatment Plant in Viseu	2014	Service provider and scientific partners in the preparation of the execution stage	Scientific advisor
13	Contract for power upgrade of hydroelectric energy production infrastructures of the Venda Nova Dam (Venda Nova III) *	2009-2010	Constructor and service providers in the execution stage	Risk manager adviser

\* Note: first risk management plan for a construction contract in Portugal based on the ISO 31000 standard.

Table 2: Results for implementation strategy

Implementation strategy	Project #												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Top management													
Specific management unit	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Integrated	x												

Table 3: Results for risk management mandate

Stakeholders	Project #												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Governmental bodies													
Banks and insurance companies													
Asset owners or their representatives	x						x	x			x		
Designers and engineering consultants		x		x									
Constructors		x	x		x	x			x	x		x	x
Subcontractors and suppliers													
Producers and laboratories													
End-users													

Table 4: Results for risk management requirements

Risk management components	Project #												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Framework	x	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x
Process	x	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Tools		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

Table 5: Results for risk management criteria

Construction management aspects (except risk)	Project #												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Integration	x	x		x	x	x					x		
Interested parties	x	x		x	x	x	x	x			x	x	
Scope	x	x		x	x	x					x		
Resources	x	x	x	x	x	x	x	x			x		
Time	x	x	x	x	x	x			x	x	x	x	x
Cost	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x
Quality	x	x		x	x	x	x	x			x	x	
Safety	x	x		x	x	x	x	x			x		
Environment	x	x		x	x	x					x		
Procurement			x								x		
Communications											x		
Financial	x	x	x	x	x	x	x	x			x		
Claims	x	x		x	x	x	x	x	x		x	x	x

Table 6: Results for life cycle phases

Stakeholders	Project #												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Strategic planning													
Programming	x										x		
Design	x	x		x					x		x		
Construction	x	x	x		x	x			x		x	x	x
Use/operation/maintenance							x	x			x		
Rehabilitation	x									x	x		
Disposal											x		

Asset owners (or their representatives) took explicit risk management leadership in projects where the customization of the components of the risk management framework was of particular importance (see examples in Table 3). But it is still a relatively common practice, given the risk management maturity of the AECO industry in Portugal, that constructors or designers are required to design and develop this framework during the tender stages. Following the experience of the risk management activity flow for owners and contractors in construction projects [25], the study shows that it is possible to implement a mixed collaborative risk management approach shaped by asset owner risk management criteria, as depicted in Figure 5.

Table 4 shows that the majority of projects benefitted from a rather complete set of risk management components, with a few exceptions to cases where the risk management scope was restricted to specific analysis focusing on a single or a smaller set of project management aspects (e.g. schedule deviations). The different risk management aspects addressed in each project are presented in Table 5.

The projects covered in this study cover a mix of pre-construction (programming and design), construction (or rehabilitation) and/or post-contraction stages (use, O&M and disposal). These results summarized in Table 6 confirm that risk management is a key to manage the whole life cycle of construction assets and assets systems [26-30].

Figure 6 represents the synergies of risk management and asset management as two complementary approaches to the life cycle management of constructed assets and asset systems.

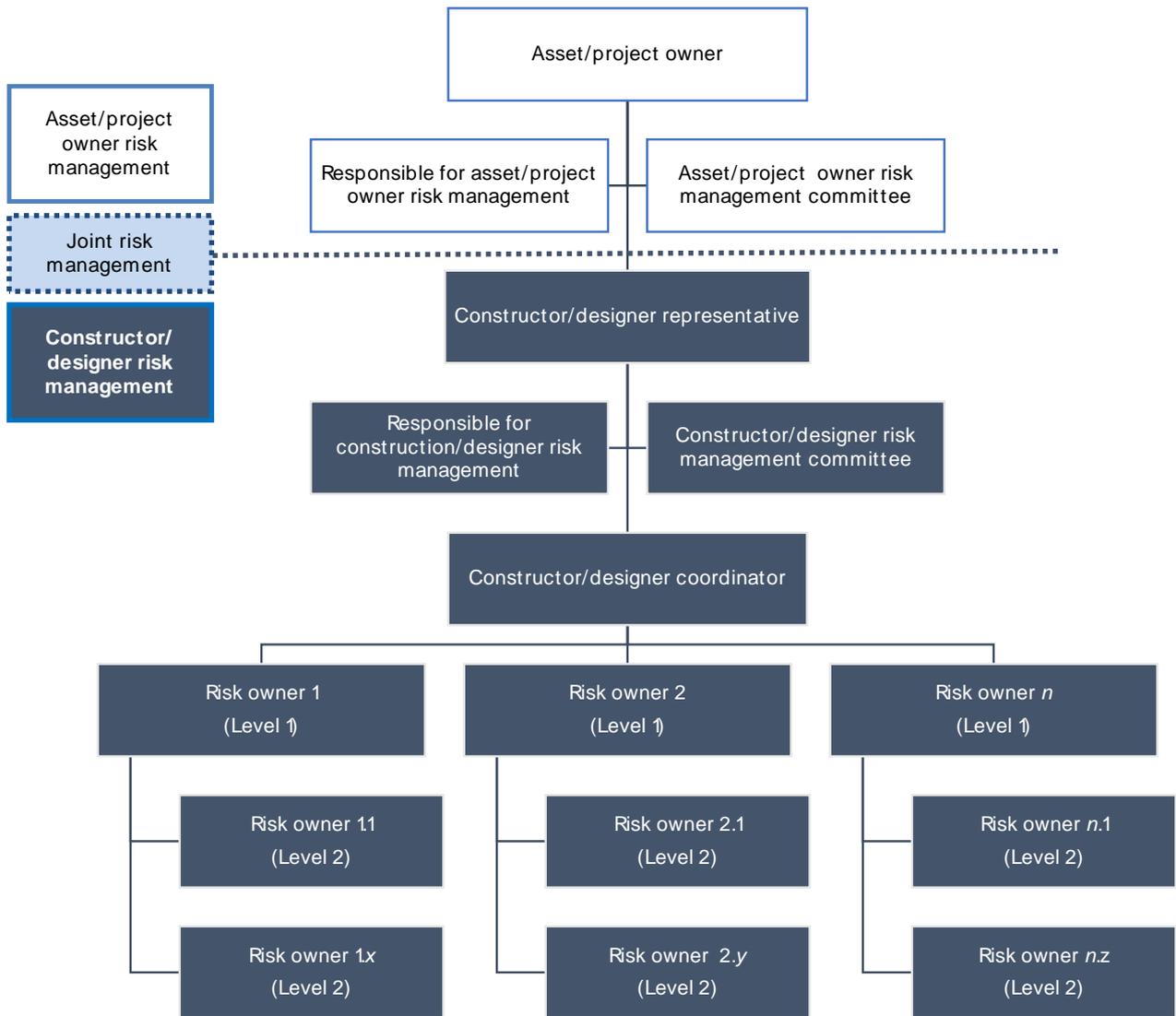


Figure 5: Simplified risk management framework for construction projects

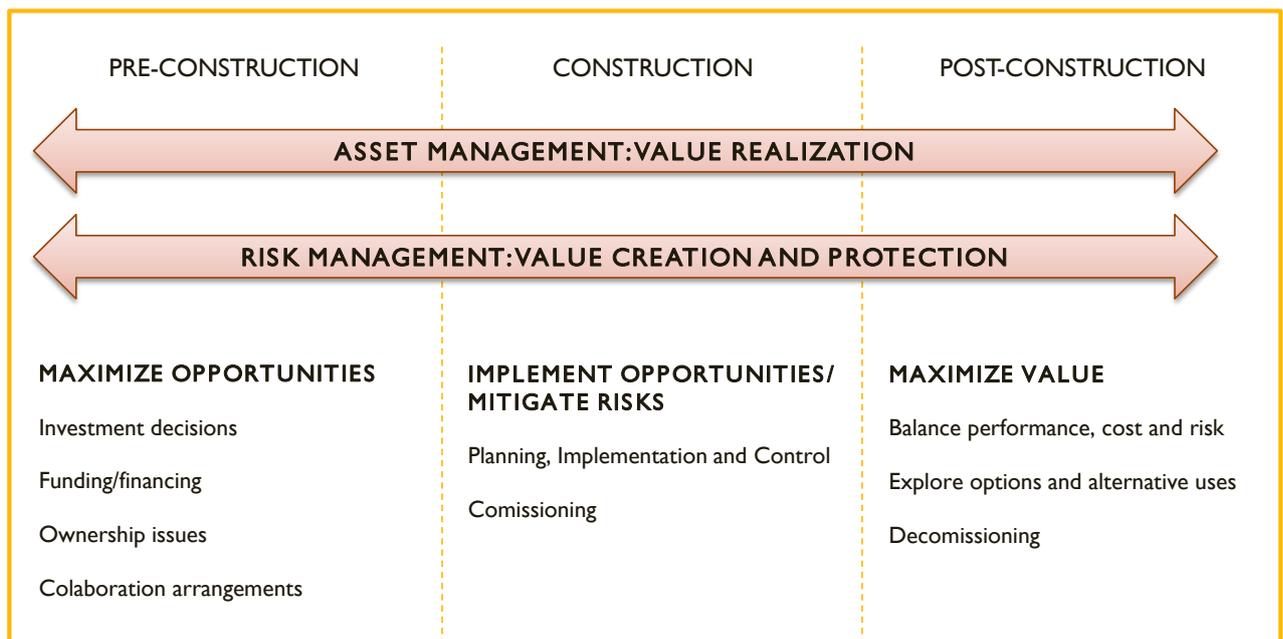


Figure 6: Life cycle management approach to constructed assets and asset systems (adapted from [31,32])

## Conclusion

This paper presents a 13 year-long study seeking to demonstrate how risk-based thinking can help boost a more sophisticated and innovative approach to managing the life cycle of constructed assets and asset systems. The paper presents an introduction to construction project risk management and a method to collect and analyse information on risk management practices in Portuguese construction and in the organizations promoting them. Results show that risk management can be combined with emerging approaches such as asset management and that these are key to structuring the way in which issues related to the performance, risk and resources (costs) are addressed throughout the entire life cycle of constructed assets and assets systems in order to achieve their overall or strategic goals and derive maximum value from them to all stakeholders of the AECO industry. It is the authors's belief that risk-based asset management is among the most promising emerging trends and strategies for the AECO industry due to its ability to address challenges and integrate decisions across the strategic planning, design, construction/rehabilitation, operation and maintenance, utilization and decommissioning activities, of any of the major categories of physical (civil) built asset systems: infrastructure, buildings and industrial facilities.

## References

- [1] Almeida, N. (2022). *Introdução à Gestão da Construção*. In N. Almeida (Ed.), *Organização e Gestão de Obras: Elementos de apoio a aulas da área temática da Gestão da Construção*. Secção de Folhas da Associação de Estudantes do Instituto Superior Técnico.
- [2] Almeida, N. (2023). *Fundamentos e perspetivas de inovação na gestão de ativos de engenharia*. *Revista Ativos de Engenharia*, 1(1).
- [3] Rezvani, S. M., de Almeida, N. M., Falcão, M. J., & Duarte, M., *Enhancing urban resilience evaluation systems through automated rational and consistent decision-making simulations*. *Sustainable Cities and Society*, (2022) 78. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103612>.
- [4] ISO 21500:2012 - Guidance on project management. International Organization for Standardization.
- [5] ISO 10006:2017 - Guidelines for quality management in projects. International Organization for Standardization.
- [6] PMI. (2016). *Construction Extension to the PMBOK® Guide*. In Inc. Project Management Institute (Ed.), Project Management Institute. <https://doi.org/10.1002/pmj>.
- [7] PMI. (2017). *PMBOK Guide | Project Management Institute*. In Inc. Project Management Institute (Ed.), PMBOK Guide. <https://www.pmi.org/pmbok-guide-standards/foundational/pmbok>.
- [8] ISO/TS 12720:2014. Sustainability in buildings and civil engineering works — Guidelines on the application of the general principles in ISO 15392.
- [9] Almeida, N. (2013). *Estrutura para a gestão do risco no sector da construção: o caso do controlo técnico da construção*. Encontro sobre Gestão do Risco na Construção - Instituto da Construção e do Imobiliário, Lisboa.
- [10] Almeida, N. M. (2011). *Modelo de gestão técnica de edifícios baseada no desempenho e no risco: concepção, desenvolvimento e exemplo de aplicação a estruturas (Universidade de Lisboa)*. <https://bibliotecas.utl.pt/cgi-bin/koha/opac-ISBDdetail.pl?biblionumber=450870>.
- [11] Almeida, N. M., Sousa, V., Dias, L. A., & Branco, F., *Engineering risk management in performance-based building environments*. *Journal of Civil Engineering and Management*, (2015) 21 (2). <https://doi.org/10.3846/13923730.2013.802740>.

- [12] ISO 9001:2015 - Quality management systems — Requirements. International Organization for Standardization.
- [13] ISO 14001:2015 - Environmental management systems — Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization.
- [14] ISO 45001:2018 - Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization.
- [15] ISO 31000:2018 - Risk management — Guidelines. International Organization for Standardization.
- [16] ISO 26000:2010 - Guidance on social responsibility. International Organization for Standardization.
- [17] ISO 55001:2014 - Asset management — Management systems — Requirements. International Organization for Standardization.
- [18] ISO 41001:2018 - Facility management — Management systems — Requirements with guidance for use. International Organization for Standardization.
- [19] ISO 56002:2019 - Innovation management — Innovation management system — Guidance. International Organization for Standardization.
- [20] ISO/TC 251. (2018). Achieving the UN Sustainable Development Goals Asset Management First Edition. <https://committee.iso.org/files/live/sites/tc251/files/guidance/ISO%20TC251%20SDG%20March%202018.pdf>.
- [21] Almeida, N., Trindade, M., Komljenovic, D., & Finger, M., *A conceptual construct on value for infrastructure asset management*. Utilities Policy, 75, (2022) 101354. <https://doi.org/10.1016/J.JUP.2022.101354>.
- [22] Schwabe, O., Schneider, L., de Almeida, N. M., & Salvado, A. F., *A Framework for Accelerating Innovation Through Innovation Webs*. In Advances in Science, Technology and Innovation, (2021). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35533-3\\_23](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35533-3_23).
- [23] ISO/IEC 31010:2019 - Risk management — Risk assessment techniques. International Organization for Standardization.
- [24] Diop, I., Abdul-Nour, G. G., Komljenovic, D., Diop, I., Abdul-Nour, G. G., & Komljenovic, D., *A High-Level Risk Management Framework as Part of an Overall Asset Management Process for the Assessment of Industry 4.0 and Its Corollary Industry 5.0 Related New Emerging Technological Risks in Socio-Technical Systems*. American Journal of Industrial and Business Management, 12(7), (2022) 1286–1339. <https://doi.org/10.4236/AJIBM.2022.127071>.
- [25] Eskesen S, Tengborg P, Kampmann J, & Veicherts T. (2004). *Guidelines for tunnelling risk management - International Tunnelling Association, Working Group No. 2. Tunnelling and Underground Space Technology*, 19, 217–237. <https://about.ita-aites.org/publications/wg-publications/70/guidelines-for-tunnelling-risk-management>.
- [26] Almeida, N. M. de, Vieira, J., Silva, J. G., & Castro, C. e., *The Impact of Asset Management Development Programs in Infrastructure Organizations*. Advances in Science, Technology and Innovation, (2021) 247–258. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35533-3\\_29](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35533-3_29).
- [27] Almeida, N., Amadi-Echendu, J., Gaspar, D., Adell, E., Torcato, J., Vieira, J., & Leite, E. (2022). *Perceived relevance of asset management topics*. WCEAM 2022: Value-Centered and Intelligent Asset Management in the 4th Industrial Revolution Era.

- [28] Komljenovic, D., Gaha, M., Abdul-Nour, G., Langheit, C., & Bourgeois, M., *Risks of extreme and rare events in Asset Management*. *Safety Science*, 88, (2016) 129–145. <https://doi.org/10.1016/J.SSCI.2016.05.004>.
- [29] Maletič, D., Almeida, N. M. de, Gomišček, B., & Maletič, M., *Understanding motives for and barriers to implementing asset management system: an empirical study for engineered physical assets*, (2022) 1–16. <https://doi.org/10.1080/09537287.2022.2026672>.
- [30] Patrício, H., & Almeida, N. (2019). *A Common Risk Framework for Road and Rail Infrastructures*. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 113–125. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-64228-0\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-030-64228-0_11).
- [31] Almeida N. (2019). *Gerir o risco e gerir ativos de infraestruturas para obter valor*. IPQ, Conferência O Risco na Gestão de Ativos. Almada.
- [32] Amadi-Echendu J. (2016). *Recognition of academic programmes in Engineering Asset Management*. WCEAM 2016, 11th World Congress on Engineering Asset Management.

## Sistemas de informação para a construção 4.0: Conteúdos, integração e interoperabilidade – Estudo de caso

RIBEIRO Y.<sup>1</sup>, TEIXEIRA J.<sup>1</sup>, MÊDA P.<sup>1,a</sup>, MOREIRA J.<sup>1</sup>, SOUSA R.<sup>1</sup> e SOUSA H.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>GEQUALTEC - Instituto da Construção, Campus da FEUP, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, Ed. G, 4200-465 Porto, PORTUGAL

<sup>2</sup>CONSTRUCT - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Campus da FEUP, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, Ed. G, 4200-465 Porto, PORTUGAL

<sup>a</sup>pmeda@fe.up.pt

**Palavras-chave:** Informação na Construção, Interoperabilidade, ProNIC, Classificação.

**Resumo.** A crescente digitalização do setor da construção tem vindo a promover evoluções nos sistemas de gestão de informação, designadamente no que diz respeito a exigências de normalização e interoperabilidade entre diferentes plataformas utilizadas no processo construtivo. Cada plataforma tem requisitos específicos e a sua compatibilização carece de um planeamento cuidado do modelo de dados, dificultado pela diferente natureza da informação. O ProNIC é uma plataforma pioneira de normalização e gestão da informação na construção em Portugal. A sua atualização encontra-se em curso ao nível dos conteúdos técnicos e da plataforma informática. A análise fundamentada da estruturação da informação é essencial no processo de capacitação para a interoperabilidade. Os parâmetros que caracterizam os artigos na estrutura de desagregação de trabalhos e que originam os MQT – Mapas de Quantidades de Trabalhos são o elemento em análise. Os parâmetros são classificados em função da essência (ex: Material), e do tipo de informação (ex: Geometria). Posteriormente, averigua-se a possibilidade de relacionamento destas classes com outras referências normalizadas de gestão, de classificação e de representação da informação, nomeadamente, formato IFC e Data Templates. Algumas classes de parâmetros revelam elevado potencial de interoperabilidade com outros sistemas. Entretanto, sendo o objetivo principal do ProNIC a produção de MQT normalizados e não sendo possível, na atualidade, a geração direta destes mapas a partir de um modelo 3D (visão de trabalhos vs. visão de objetos), as classes de parâmetros apresentadas são fundamentais para assegurar a qualidade do conteúdo, a interoperabilidade e, com isso, o desenvolvimento mais eficiente dos processos.

### Introdução

Um projeto tradicional do setor AEC – Arquitetura, Engenharia, Construção, contém dois grandes grupos de documentos: Peças Desenhadas; que devem fornecer uma representação visual completa do produto final, e Peças Escritas; que são essenciais para a compreensão e execução adequada das peças desenhadas. Podem também existir outros documentos, tais como cálculos, medições detalhadas, estimativa de custos, planeamento da obra, recursos, mão-de-obra e análise específica da especialidade de projeto.

As Peças Desenhadas são compostas por diferentes tipos de visualizações, incluindo mapas, topografia, secções transversais, representações 3D, secções detalhadas, renderizações e esquemas técnicos. As Peças Escritas fornecem especificações técnicas, mapas de trabalhos e quantidades, listas de materiais e equipamentos, medições detalhadas e descrições de construção/função.

Estes duas facetas do mesmo projeto são por natureza interdependentes, mas tendem a existir incompatibilidades, fruto da segmentação em inúmeras especialidades de projeto envolvidas, e das peças serem produzidas, e por vezes entregues, separadamente. A digitalização, entre outros benefícios, pode facilitar a forma como os distintos elementos de informação do projeto se relacionam. Contudo, para ser eficaz, exige estruturas de informação normalizadas e interoperáveis [1].

A adoção de práticas BIM – Building Information Modelling em Portugal é ainda baixa [2], e muitas vezes está focada preferencialmente na materialização do modelo geométrico 3D, já que, independentemente do nível de detalhe, os elementos desenhados são o ponto de partida na generalidade dos projetos, e uma das partes essenciais de comunicação à obra, independentemente do tipo de contrato estabelecido. No entanto, os documentos escritos fornecem uma especificação e quantificação dos materiais e recursos necessários, bem como definições e especificações para os processos tecnológicos a empregar na construção. Aligeirar ou apressar a sua produção pode levar a erros ou omissões que se traduzem em riscos para o cumprimento dos objetivos do projeto.

O MQT – Mapa de Quantidades de Trabalhos é um elemento das Peças Escritas estruturante para a definição do contrato de empreitada, pois faz a interligação de toda a informação do projeto, uma vez que sistematiza os trabalhos, as suas quantidades e custos associados. É o elemento que é usado para a programação da obra ao nível da sequenciação das atividades, contribuindo para a definição dos prazos.

A presente comunicação tem como propósito divulgar um estudo de caso que decorre da atualização em curso da plataforma ProNIC – Protocolo para a Normalização da Informação Técnica na Construção, no âmbito do Projeto Mobilizador REV@CONSTRUCTION [3], abordando os pressupostos relativos a conteúdos, integração e interoperabilidade que devem ser tidos em conta no contexto dos Sistemas de informação para a Construção 4.0.

### **Informação preliminar**

O ProNIC – Protocolo para a Normalização da Informação Técnica na Construção [4] – é uma plataforma para normalização de conteúdos técnicos para obras de edifícios e de estradas e para a sistematização e integração de informação durante o processo construtivo. Entre as suas funcionalidades, destacam-se a geração de mapas de quantidades de trabalhos com artigos normalizados e padronizados, geração de condições técnicas “gerais”, geração de estimativas orçamentais, e agregação de elementos de informação (peças desenhadas e/ou peças escritas) internos ou externos.

O desenvolvimento inicial do ProNIC decorreu entre 2005 e 2008, ao mesmo tempo que era publicada uma nova versão do CCP – Código dos Contratos Públicos, e continuou a ser melhorado aquando da sua utilização pela Parque Escolar, EPE – empresa pública responsável pela renovação das escolas secundárias em Portugal – no período 2009 a 2015, e com menor intensidade desde 2016 até à atualidade [5].

O ProNIC está a passar por uma grande atualização quer a nível dos conteúdos técnicos quer a nível da plataforma informática, enquadrado no Projeto Mobilizador REV@CONSTRUCTION, que visa acelerar a implementação dos princípios da Construção 4.0 em Portugal. Embora o ProNIC tenha nascido muito antes deste projeto, o seu legado [6] potencia a implementação desta lógica da Construção 4.0.

O aumento das exigências regulamentares ao nível das análises-ambiental, térmica, ciclo de vida, entre outros, e o crescente número de partes interessadas/envolvidas no processo construtivo exigem mais informação e um maior esforço para a gestão desta informação, bem como a garantia da sua consistência, mesmo quando dispersa em elementos com origens e formas distintas.

Sendo o MQT basilar na preparação de um projeto de execução e o elemento-chave sobre o qual o ProNIC está estruturado, é fundamental perceber a natureza da informação presente na parametrização de cada artigo para determinar que outros elementos de informação poderão relacionar-se com esse artigo.

### **Metodologia**

Um CICS – Sistema de Classificação da Informação na Construção deve apresentar, em última instância, as propriedades relativas a cada objeto. Estas propriedades são fundamentais nas várias

tomadas de decisão durante o processo construtivo, já que são estas mesmas propriedades que definem o objeto em si [7].

No ProNIC, para a elaboração de MQTs, além da seleção do artigo, é necessário fornecer informações de caracterização dos materiais, elementos, trabalhos, ou outras informações que o projetista considere relevantes. Os campos que recebem essas informações, pré-definidas ou não, são designados parâmetros do artigo, e completam o texto padronizado, formando finalmente um artigo normalizado mas único, caracterizando devidamente as condições específicas daquele projeto. A análise realizada nesta investigação foi efetuada ao nível dos parâmetros dos artigos.

Apresenta-se de seguida um exemplo de um texto de artigo padronizado existente no ProNIC:

*“Execução de PAVIMENTOS TÉRREOS em betão armado normal “cinzento” com \$1 de espessura, incluindo fornecimento, colocação, compactação e cura de betão \$3, \$4, \$5, \$6, \$7 \$8 \$2 \$20 \$21 \$22 \$23 \$30 \$31; transporte, montagem, desmontagem, óleo descofrante e limpeza de cofragem; fornecimento, colocação, carga e descarga, desperdícios e empalmes e elementos de montagem de armaduras certificadas em aço \$9, e todos os trabalhos, nomeadamente juntas de construção e retração, selagem de juntas, elementos de transferência de carga, materiais e execução de acordo com o projeto.”*

Os parâmetros são codificados como “\$número” enquanto não forem editados pelo projetista. Não há nenhum significado especial na codificação atribuída, e pode mesmo variar para os mesmos parâmetros em diferentes artigos.

Com o preenchimento das opções definidas, o mesmo artigo pode assumir a seguinte forma:

*“Execução de PAVIMENTOS TÉRREOS em betão armado normal “cinzento” com 0.20 m de espessura, incluindo fornecimento, colocação, compactação e cura de betão C35/45, XA1, Cl 0.20, S3, Dmáx 12 mm com incorporação de hidrófugo, aplicação de endurecedor de superfície de agregados de corindo, na cor antracite, resist. à abrasão (BOHME) A6, na dosagem de 4 [kg/m<sup>2</sup>], filme de polietileno com 0.20 mm de espessura; transporte, montagem, desmontagem, óleo descofrante e limpeza de cofragem; fornecimento, colocação, carga e descarga, desperdícios e empalmes e elementos de montagem de armaduras certificadas em aço A400 NR-SD, e todos os trabalhos, nomeadamente juntas de construção e retração, selagem de juntas, elementos de transferência de carga, materiais e execução de acordo com o projeto.”*

Portanto, cada \$número representa um parâmetro com uma característica específica que define efetivamente o artigo.

Os parâmetros podem também possuir “nomes” que são uma forma para o utilizador da plataforma identificar qual a informação que está associada a esse parâmetro. Este nome não tinha sido atribuído em alguns casos, pelo facto de o mesmo ser claro ao visualizar as opções pré-definidas disponíveis.

Um mesmo parâmetro pode aparecer diversas vezes no articulado; por exemplo, os parâmetros que caracterizam o material betão irão aparecer sempre que no artigo existir o material betão. A distribuição do número de vezes em que os mesmos parâmetros aparecem num articulado ilustra bem parte da lógica da construção desse articulado, tal como exemplificado na Figura 1, referente ao capítulo de Fundações e Estruturas. Apenas 13% dos parâmetros distintos representam 80% do acumulado das ocorrências dos parâmetros nos artigos (sombreado verde), e 40% dos parâmetros distintos já representa a quase totalidade (95%) do acumulado (sombreado amarelo).

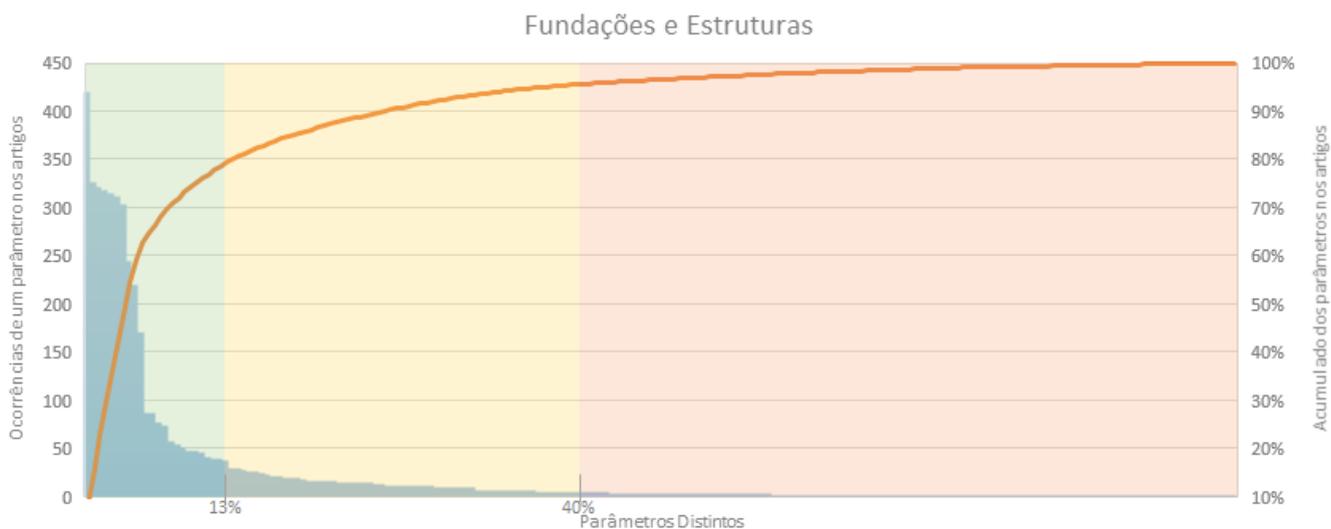


Figura 1: Histograma e distribuição cumulativa de parâmetros pelo n.º de vezes que aparecem no articulado

Durante a atualização do ProNIC, vários campos associados aos parâmetros estão a ser revistos, incluindo a forma de codificação “\$número”, para que passe a ser um código único por parâmetro, independente do artigo, permitindo regularizar o seu nome e reduzindo o volume de informação, e assim melhorar a performance, interoperabilidade e usabilidade da plataforma.

Para permitir uma melhoria da interoperabilidade futura entre os artigos do ProNIC e outras estruturas de informação da construção, é também necessário classificar os parâmetros dos artigos para compreender qual o seu impacto/contributo para o artigo como um todo, em virtude da sua essência (ex: Material), e do tipo de informação (ex: Geometria). Esta classificação é determinante para analisar o potencial de relacionamento com as diferentes referências normalizadas de gestão, de classificação, e de representação da informação da construção, tais como IFC [8] e Data Templates [9].

As três letras iniciais do novo código resultam da classificação do parâmetro quanto:

- ao que se refere:
  - Material
  - Elemento
  - Trabalho
  - Outra
  - Informação adicional
- ao que atribui:
  - Propriedade
  - Geometria
  - Condição/Condicionante
  - Local
  - Identificação
  - Outro
  - N/A
- ao complemento das informações anteriores
  - (valores diversos)

As classes escolhidas para as duas primeiras facetas de classificação basearam-se no tipo de relações e tabelas constantes na norma ISO 12006-2 [10] quando aplicadas ao MQT, que é uma lista de trabalhos da construção, efetuados com recurso a materiais de construção, resultando em elementos construtivos. Esta norma foi, nas versões anteriores, foi já a utilizada na definição da arquitetura tecnológica do ProNIC. Para a correta execução desses trabalhos, são necessárias diferentes informações, cuja natureza induz possibilidades distintas de interoperabilidade com outras peças do projeto.

A terceira letra da codificação é complementar e dependente da combinação das primeiras duas. Permite aumentar o detalhe dessas facetas de classificação, por exemplo, se um parâmetro se refere à geometria de um elemento acabado, ou apenas à geometria de uma parte ou fração do elemento.

Aplicando a classificação proposta aos parâmetros do artigo previamente apresentado, obtém-se a Tabela 1, onde os dígitos e a letra final servem apenas para evitar repetições de códigos no sistema.

Tabela 1: Exemplo de nova codificação de parâmetros do artigo

Código Original	Nome original	Novo Código	Nome revisto
\$1	Indicar a espessura da laje de betão do pavimento [m]	EGX005E	Espessura
\$2		TCO015E	Endurecedor de superfície
\$3	Resistência à compressão	MPI003E	Resistência à compressão
\$4	Classe de exposição ambiental	MPI001E	Classe de exposição ambiental
\$5	Cloretos	MPI007E	Cloretos
\$6	Consistência	MPI002E	Consistência
\$7	Dmax do agregado [mm]	MGP001E	Dmax do agregado
\$8		TCO001E	Aditivos e Adjuvantes
\$9	Tipos de aço	MID001E	Tipos de aço
\$20	Tipo de endurecedor	MIN007E	Tipo de endurecedor
\$21	Especificar cor	MPV001E	Especificar cor
\$22	Especificação da Resistência à Abrasão (BOHME)	MPI013E	Especificação da Resistência à Abrasão (BOHME)
\$23	Dosagem [kg/m <sup>2</sup> ]	MCO003E	Dosagem
\$30	Elemento de dessolidarização	EIN004E	Elemento de dessolidarização
\$31	Características adicionais	XXX001E	Características adicionais

Devido à criação de campos específicos para a unidade de medição e texto complementar, e pela necessidade da uniformização entre artigos, alguns nomes dos parâmetros foram também atualizados. Em resumo, a classificação realizada está refletida nas duas primeiras letras da codificação, como ilustrado na Tabela 2, e exibe informação fundamental para a caracterização do conteúdo técnico do ProNIC. A partir da análise destes códigos, foi possível atestar quantitativamente a diversidade da natureza das informações necessárias para a criação de um MQT no ProNIC.

Tabela 2: Classificação de parâmetros do artigo

Novo Código	Refere-se a	Atribui
EGX005E	Elemento	Geometria
TCO015E	Trabalho	Condição/condicionante
MPI003E	Material	Propriedade
XXX001E	Informação adicional	N/A

Informações de natureza diferente devem ser armazenadas em estruturas de dados diferentes [11]. Por exemplo, características geométricas de elementos ou propriedades de materiais são facilmente interligadas a classes IFC de geometria e às suas propriedades. Informações relativas a trabalhos de construção podem também ser associadas ao formato IFC usando a classe *IfcTask* e a relação *IfcRelAssignsToProcess*, ou, em alternativa, podem ser armazenadas numa estrutura de dados independente (por exemplo, em formato JSON, XML ou SQL), que poderá ser relacionada com o modelo e com os dados de planeamento e orçamento, seguindo a estratégia buildingSMART

[12]. A manutenção desta estrutura de dados independente, mas relacionável com a do modelo 3D, é compatível com a noção de *information container* prevista na norma ISO 19650 [13].

Portanto, a análise realizada consiste na identificação, quantificação e distribuição dos parâmetros quanto a (Refere-se a) Materiais, Elementos, Trabalhos, Outra, Informação adicional e como se distribuem quanto a (Atribui) Propriedade, Geometria, Condição ou Condicionante, Outro, N/A, para que se possa avaliar qual o impacto de parâmetros que não possuem ligação adequada direta aos modelos de dados padrão.

## Resultados

O articulado ProNIC foi particionado de modo a agregar capítulos semelhantes ou fortemente relacionados. Os resultados apresentados são para dois destes exemplos, concretamente a reunião dos capítulos de Estaleiro e Trabalhos Preparatórios e dos capítulos de Arranjos Exteriores e Equipamentos Fixos e Móveis. A escolha destes tem como base, por um lado a sua importância para um MQT em termos de expressão económica numa obra e, por outro lado, por serem capítulos relativamente abrangentes ao nível dos trabalhos que incluem e distintos entre si.

Para a primeira classificação de “Refere-se a” os resultados obtidos e ilustrados na Figura 2 refletem bem o esperado para as partições analisadas.

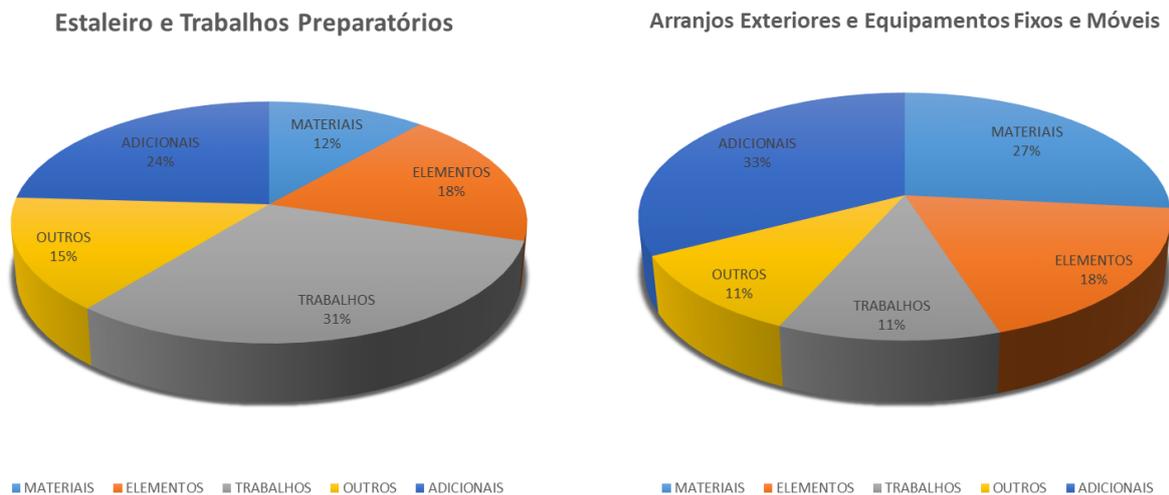


Figura 2: Distribuição dos parâmetros para a classificação

Os Trabalhos apresentam uma relevância considerável, principalmente para a partição de “Estaleiro e Trabalhos Preparatórios”, como era esperado. Ainda na Figura 2, salienta-se o seguinte:

- para a partição de “Estaleiro e Trabalhos Preparatórios”, a relevância relativamente baixa de Materiais (12%) e Elementos (18%);
- a grande relevância das classes Informação Adicional e Outros em ambas as partições (totalizando 39% e 44%, respetivamente).

A classe Informação Adicional representa parâmetros que possibilitam ao projetista inserir informações de forma livre para Elementos, Materiais ou Trabalhos. A classe Outros é para parâmetros que não se encaixam em nenhuma das outras.

A análise para a segunda classificação foi realizada observando a ligação entre esta e a classificação inicial, presente nas Figuras 3 e 4. As Figuras 5 e 6 apresentam uma forma diferente de visualizar a mesma informação de relacionamento entre as duas classificações, enfatizando os pesos relativos.

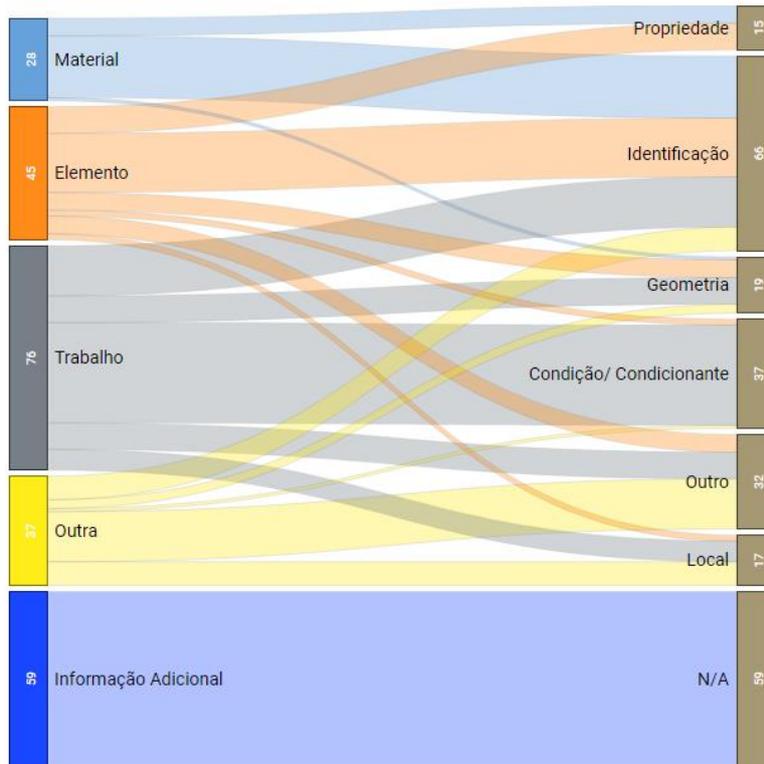


Figura 3: Ligação dos dois níveis de classificação na partição Estaleiro e Trabalhos Preparatórios

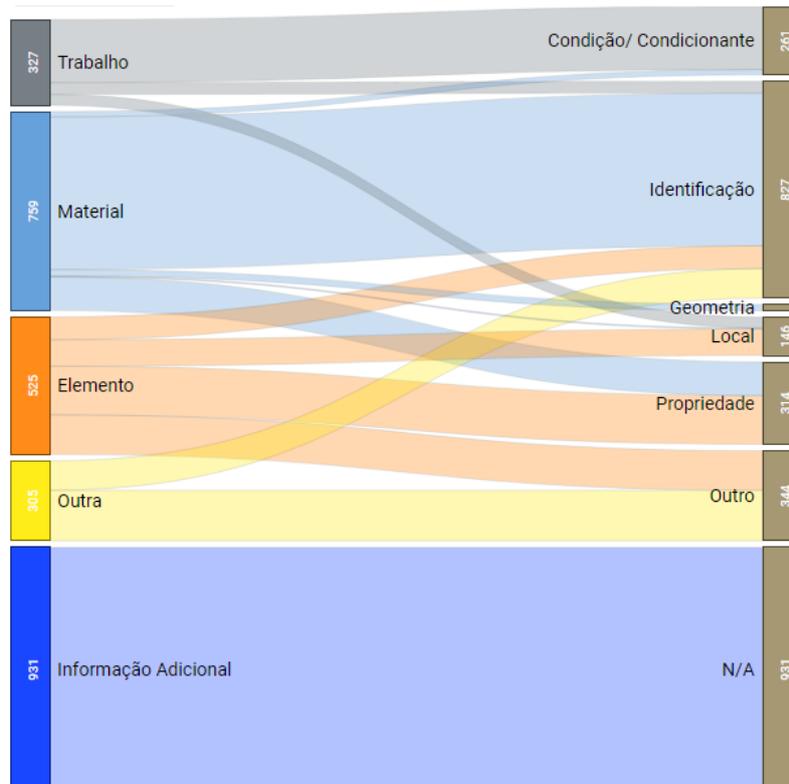


Figura 4: Ligação dos dois níveis de classificação na partição Arranjos Exteriores e Equipamentos Fixos e Móveis

## Estaleiro e Trabalhos Preparatórios

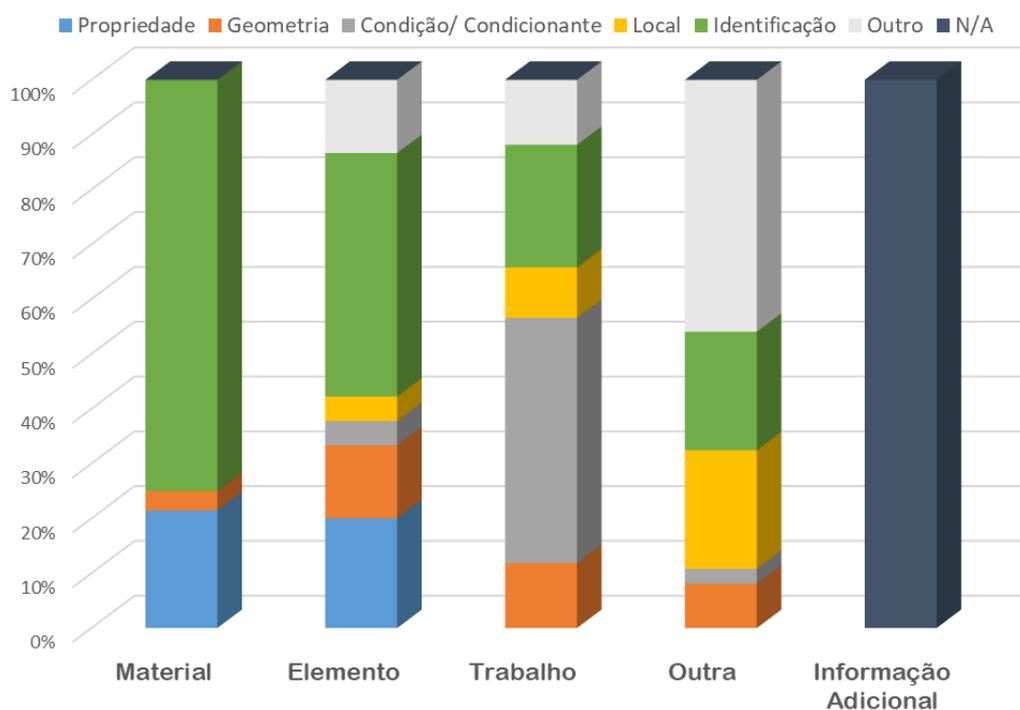


Figura 5: Distribuição dos dois níveis de classificação para a partição Estaleiro e Trabalhos Preparatórios

## Arranjos Exteriores e Equipamentos Fixos e Móveis

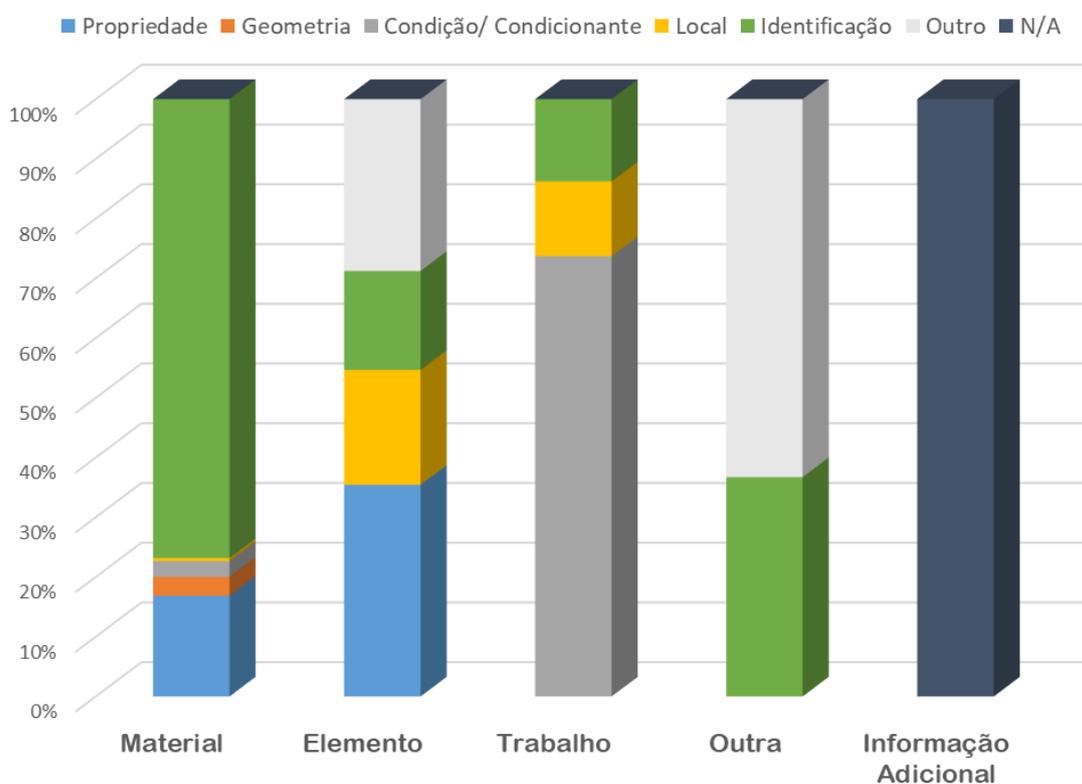


Figura 6: Distribuição dos dois níveis de classificação para a partição Arranjos Exteriores e Equipamentos Fixos e Móveis

Da análise das Figuras 3, 4, 5 e 6, observa-se que:

- os Trabalhos possuem várias atribuições, com destaque para Identificação e Condições/Condicionantes do trabalho; os Elementos também possuem grande variabilidade;
- os Materiais concentram as suas atribuições em Propriedades e Identificação;
- a Informação Adicional liga-se sempre a N/A, porque, por definição, não é possível prever exatamente ao que o projetista se pretende referir e complementar.

## Conclusão

A análise realizada revelou que há uma quantidade relevante de informação necessária para a criação de um MQT que não se enquadra nem em Elementos nem em Materiais, sendo que esta dificilmente se encontra nos modelos 3D produzidos usualmente. Além disso, a criação de um MQT depende intimamente de informações que podem não ter correspondência direta em outras plataformas (que não o ProNIC), principalmente as que não utilizam a lógica de trabalhos.

Da análise destaca-se que:

- os Trabalhos possuem vários tipos de atribuições de parâmetros, o que reitera a necessidade de criar mecanismos de interoperabilidade entre sistemas para além do simples modelo tridimensional, para que não se perca informação relevante;
- as Informações Adicionais têm um peso considerável. Apesar de essa informação ser não estruturada e, por isso, mais difícil de classificar, pode e deve ser de alguma forma guardada como texto/string, ficando em aberto trabalho futuro na área de *machine learning* para agilizar futuras revisões.

A implementação de mecanismos de interoperabilidade deve prever que a informação do MQT esteja disponível ao longo do ciclo de vida do empreendimento, pelo que as estruturas de dados existentes num modelo 3D devem ser interpretáveis pelo ProNIC e associadas a artigos/parâmetros no MQT, e um MQT criado no ProNIC deve poder ser uma origem de dados do modelo 3D.

As classificações de parâmetros dos artigos do ProNIC e análise da sua preponderância representam o primeiro passo do desenvolvimento de uma metodologia de integração entre Sistemas de informação para a Construção 4.0 assente em princípios de interoperabilidade e estruturas de armazenamento de dados adequadas à natureza dessa informação.

## Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: Projeto Mobilizador “REV@CONSTRUCTION - Digital Construction Revolution”, POCI-01-0247-FEDER-046123, financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (COMPETE 2020), parte da estratégia Portugal 2020.

## Referências

- [1] P. Mêda Magalhães, D. Calvetti, D. Kifokeris, e M. Kassem, *A process-based framework for digital building logbooks*, apresentado na 2022 European Conference on Computing in Construction, jul. 2022. doi: 10.35490/EC3.2022.183.
- [2] M. J. L. Venâncio, *Avaliação da implementação de BIM – Building Information Modeling em Portugal*, 402, 2015.
- [3] C. ProNIC, Projeto Mobilizador Digital Construction Revolution - REV@CONSTRUCTION: *Entregável 3.1 - Interfaces: Identificação e caracterização de necessidades/oportunidades de integração/interoperabilidade*, 78, 2021.
- [4] A. Monteiro, P. Mêda, e J. Poças Martins, *Framework for the coordinated application of two different integrated project delivery platforms*, Automation in Construction, vol. 38, (2014) 87–99, doi: 10.1016/j.autcon.2013.11.003.

- [5] P. Mêda e H. Sousa, *ProNIC Contributions for Building Refurbishment – Procedures and Technology*, em *Sustainable Construction*, vol. 8, Singapore: Springer Singapore (2016). doi: 10.1007/978-981-10-0651-7.
- [6] P. Mêda, D. Calvetti, Y. Ribeiro, J. Teixeira, e J. Moreira, *Legacy practices supporting BIM adoption in Portugal – Reflexions from a large Use Case*, apresentado na 14th European Conference on Product & Process Modelling (ECPPM 2022), Trondheim, Norway, set. 2021.
- [7] R. Pina, M. C. Gonçalves, P. M. Magalhães, e D. Calvetti, *Informação da Construção em Usos BIM – Estudo de Caso*, em 3o Congresso Português de «Building Information Modelling», Porto, Portugal, 2020, pp. 749–760. doi: 10.24840/978-972-752-272-9\_0749-0760.
- [8] M. Laakso e A. Kiviniemi, *The IFC Standard - A Review Of History, Development, And Standardization*, p. 29.
- [9] ISO 23387:2020(E). *Building Information Modelling (BIM)—Data Templates for Construction Objects Used in the Life Cycle of Any Built Asset—Concepts and Principles*. ISO: Vernier, Switzerland, 2020.
- [10] ISO 12006-2: 2015 - *Building construction - Organization of information about construction works — Part 2: Framework for classification*. 2015.
- [11] D. Calvetti et al., *BIM WD: A Dimensão dos Trabalhadores Integrada nos Modelos de Informação*, em 3o Congresso Português de «Building Information Modelling», Porto, Portugal, 2020, pp. 131–140. doi: 10.24840/978-972-752-272-9\_0131-0140.
- [12] buildingSMART, *Technical Roadmap buildingSMART: Getting ready for the future*. 2020. [Em linha]. Disponível em: <https://www.buildingsmart.org/standards/technical-roadmap/>
- [13] ISO 19650-1:2018 *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) — Information management using building information modelling — Part 1: Concepts and principles*. 2018.

## Inspeção e diagnóstico de edifícios sujeitos a infiltração de água no porto de Gibraltar

BARONTINI Alberto<sup>1,a</sup> e LOURENÇO Paulo B.<sup>1,b</sup>

<sup>1</sup>Universidade do Minho, ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal

<sup>a</sup>albe.barontini@gmail.com, <sup>b</sup>pbl@civil.uminho.pt

**Palavras-chave:** Chuva Dirigida, Património, Intervenção, Inspeção, Ensaios Não-Destrutivos.

**Resumo.** O presente trabalho apresenta a inspeção e diagnóstico efetuado em dois edifícios patrimoniais localizados na zona do porto de Gibraltar, e sujeitos às ações de vento e chuva dirigida. Os edifícios apresentam infiltração de água e humidade na fachada. O estudo incluiu o levantamento do dano existente e ensaios no local, nomeadamente ensaios não-destrutivos (inspeção com câmara termográfica, e ensaios sónicos e de infiltração de água) e ensaios semi-destrutivos (inspeção com câmara boroscópica). A inspeção e diagnóstico permitiu concluir que a ausência de reboco e elementos de proteção, como beirais e rufos, causam a acumulação de águas pluviais nas superfícies horizontais do edifício (coroamento de paredes e cornijas) e, conseqüente, infiltração através das fissuras existentes. Por último, apresentam-se recomendações para a correção das anomalias identificadas, em conformidade com os critérios das autoridades locais para intervenções no património, tais como injeção das fissuras com argamassa fluída, instalação de rufos, e implementação de um plano de inspeção e manutenção.

### Introdução

O presente trabalho visa apresentar os resultados da campanha de inspeção e diagnóstico de dois edifícios sujeitos à vento forte e chuva dirigida. É comumente indicada como chuva dirigida pelo vento a junção de chuva e vento que induz uma queda oblíqua das gotas de chuva devida à ação horizontal do vento [1]. A chuva dirigida é provavelmente a principal fonte de acumulação de humidade nas fachadas dos edifícios e contribui para a deterioração do seu desempenho higrotérmico e durabilidade com fenómenos como infiltração, processos de molhagem e secagem, congelamento, migração de sal e eflorescência, microfissuras, sujidade e descoloração [2].

Os dois edifícios pertencem a um conjunto de estruturas com características semelhantes, situadas na zona do porto de Gibraltar. Gibraltar é sujeita a ventos predominantes de leste e oeste. O clima é caracterizado por uma humidade relativa moderadamente alta, em média acima de 70%. As precipitações anuais variam significativamente, como é típico do clima mediterrâneo. No entanto, a probabilidade de chuva é maior do que ao longo da costa mediterrânea da Espanha, provavelmente devido à influencia atlântica sobre o clima local [3].

O objetivo da campanha de inspeção e diagnóstico foi identificar as causas da infiltração de água nos dois edifícios, bem como recomendar medidas de prevenção e de reparação a adotar. No local, o dano foi mapeado, com especial atenção às fissuras, e foram realizados ensaios não destrutivos (inspeção com câmara termográfica, e ensaios sónicos e de infiltração de água) e semi-destrutivos (inspeção com câmara boroscópica). As seções a seguir fornecem mais detalhes sobre essas atividades, bem como as principais conclusões e recomendações.

### Casos de estudo

Os dois edifícios inspecionados, denominados Edifício A e Edifício B (Figura 1), apresentam características muito semelhantes: originalmente de um andar, com paredes de alvenaria de pedra irregular sem reboco (Figura 2a) e estrutura metálica interna (Figura 2b). As vigas metálicas estão diretamente ligadas às paredes portantes (Figura 3).

A espessura das paredes portantes varia entre 0.30 e 0.60 m. As juntas são preenchidas com argamassa. Principalmente o Edifício A foi sujeito a intervenções como preenchimento ou refechamento das juntas e injeção das fissuras. As paredes não estruturais internas separam as áreas pertencentes a proprietários diferentes e alojam, em cavidades, umas colunas metálicas (Figura 4). Nas fundações são usadas estacas de madeira.

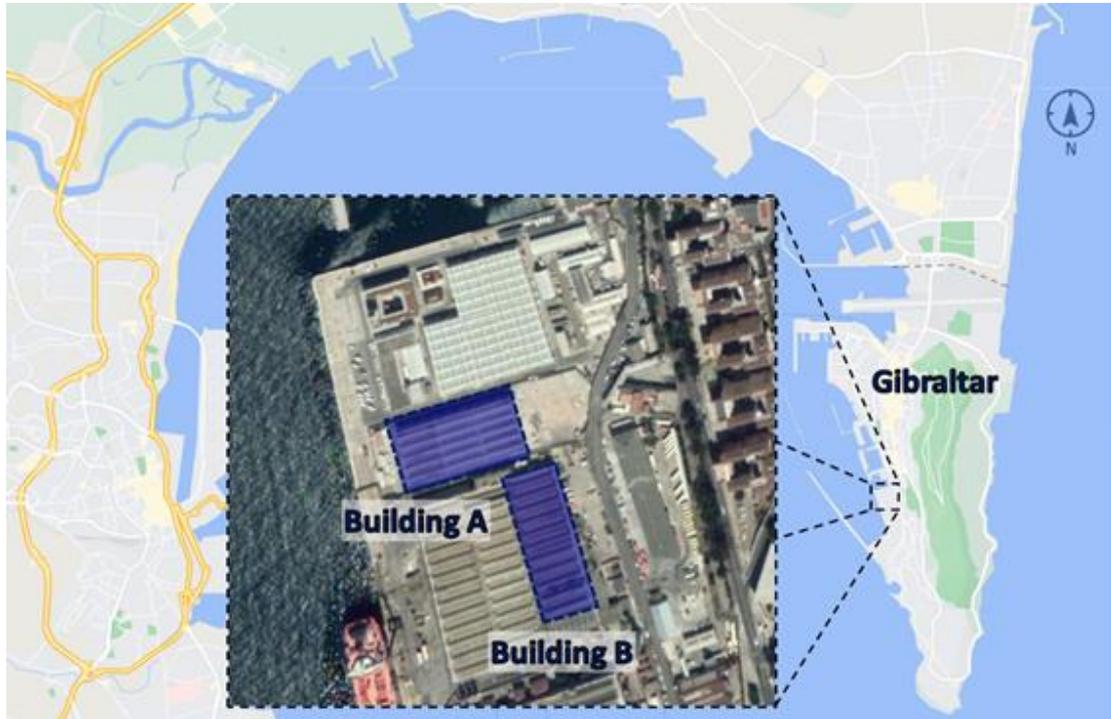
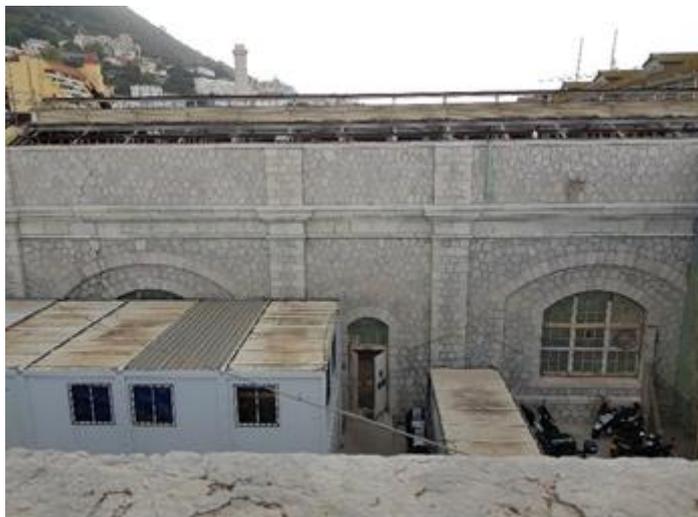


Figura 1: Identificação dos edifícios inspeccionados e localização em Gibraltar



(a)



(b)

Figura 2: Edifício B: (a) fachada norte; (b) estrutura metálica interna



Figura 3: Edifício B, exemplo de ligações entre vigas metálicas e paredes portantes em alvenaria de pedra



Figura 4: Paredes não estruturais e colunas metálicas

A construção dos edifícios teve lugar no 1896-1904, a finalidade deles mudou ao longo do tempo, incluindo industrial e militar, e provavelmente sofreram modificações só parcialmente documentadas. A área foi significativamente afetada pela explosão do RFA Bedenham, um navio atracado em Gibraltar, em 1951. Atualmente, o Edifício A está em uso, enquanto o Edifício B encontra-se sujeito a uma intervenção de reabilitação. Ambos são classificados como património de interesse local, portanto, as ações permitidas são limitadas e devem cumprir com os critérios das autoridades para intervenções no património.

### Levantamento do dano

A inspeção visual realizada no Edifício B permitiu identificar todas as patologias e elaborar um levantamento detalhado das fissuras e do dano. Em particular, o canto nordeste do edifício apresenta um padrão de fendas passantes que afetam principalmente a argamassa, com perda de material

(Figuras 5 e 6). O tipo de dano nesta área está relacionado com um assentamento da fundação que induz uma rotação para o exterior do canto do edifício. De acordo com relatos obtidos no local, esta rotação foi provavelmente causada por uma rutura no sistema de drenagem ou de abastecimento de água.

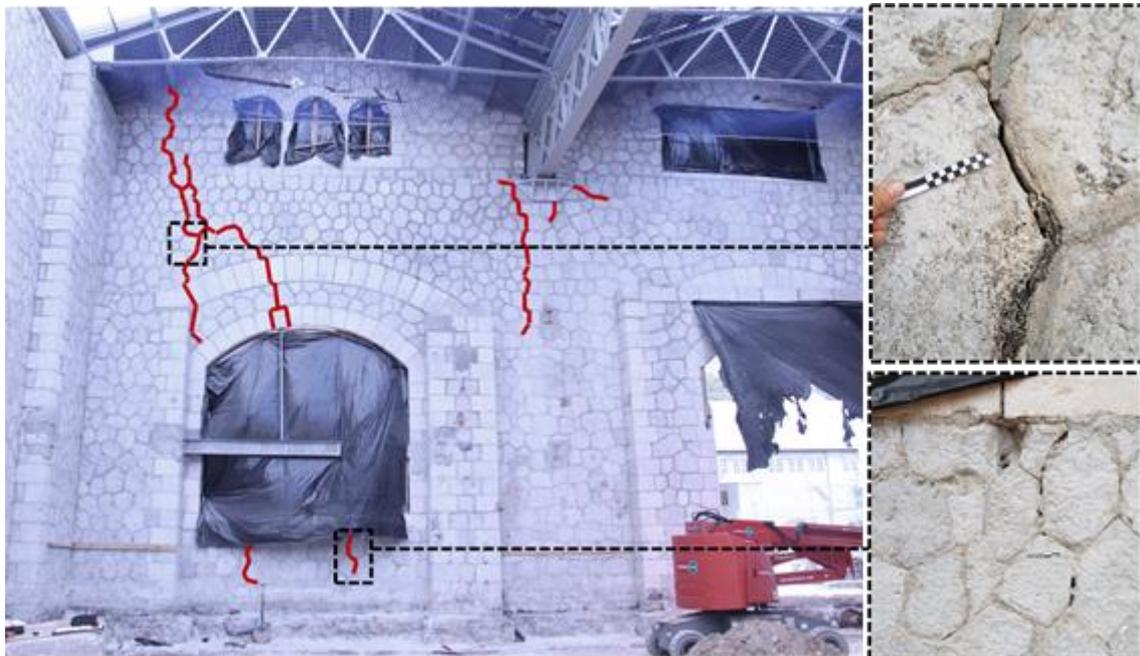


Figura 5: Padrão de fissuração no canto nordeste, interior

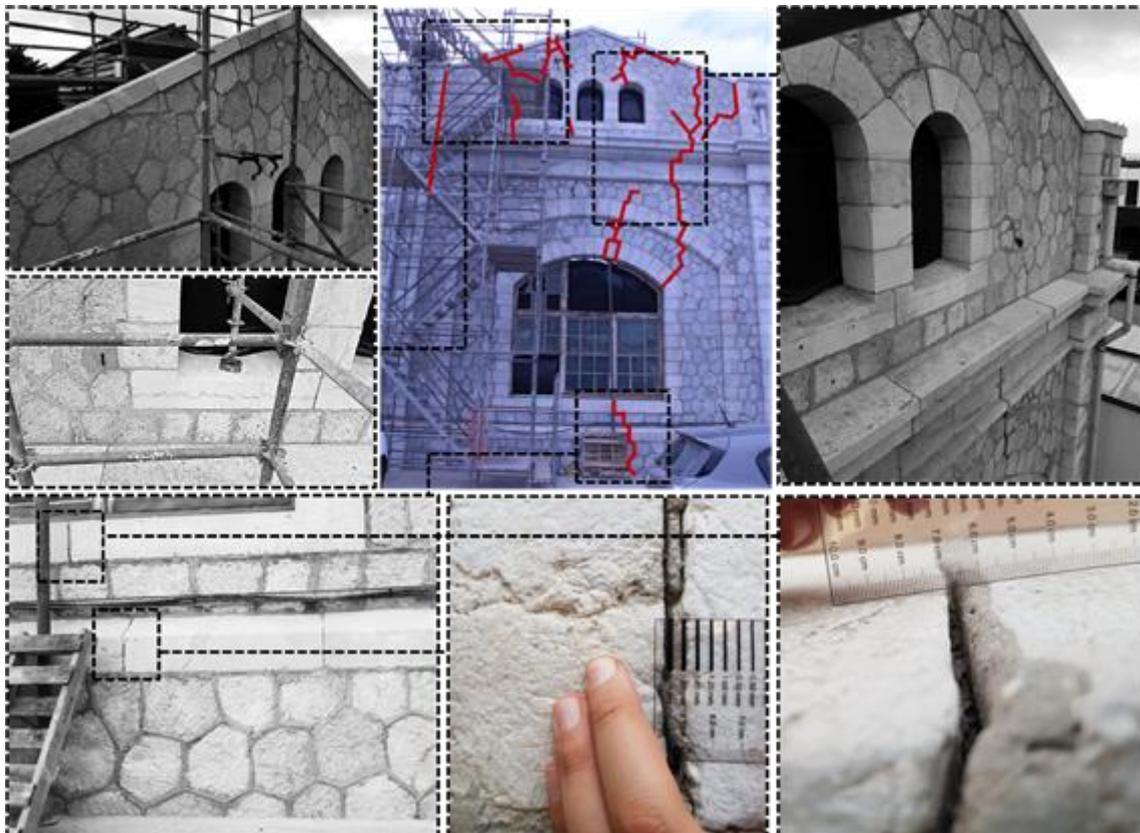


Figura 6: Padrão de fissuração no canto nordeste, exterior

Na fachada leste, é visível uma fissura horizontal nos dois lados das janelas (Figura 7) provavelmente devido a um movimento fora do plano induzido por uma deformação do sistema de

cobertura que está ligado a esta fachada, por exemplo, sob carga gravitacional, dilatação térmica e/ou ventos fortes.

Além disso, durante a visita, foram inspecionadas as fundações das colunas e das paredes. A base das colunas principais encontra-se severamente afetada por um intenso processo de corrosão. Um dos pilares alojados na parede não estrutural foi inspecionado e não apresenta uma deterioração grave na parte exposta, embora não tenha sido possível inspecionar integralmente a sua base. As estacas de madeira estão significativamente degradadas.



Figura 7: Padrão de fissuração na fachada leste

## Ensaio

No local, foram realizados ensaios não destrutivos (inspeção com câmara termográfica, e ensaios sónicos e de infiltração de água) e semi-destrutivos (inspeção com câmara boroscópica).

Uma câmara de 3.8 mm de diâmetro colocada na extremidade de um tubo flexível de 1.2 m de comprimento permitiu a inspeção das fendas e das folgas já existentes e de três furos efetuados na parede com 12 mm de diâmetro e cerca de 0.5 m de profundidade. A inspeção não permitiu identificar a existência de vazios de grandes dimensões dentro das paredes. Alguns pequenos vazios foram encontrados, provavelmente devido às irregularidades das pedras e à deterioração das juntas (Figura 8a). Em relação à morfologia da seção transversal, o resultado das observações confirmou a presença de uma ou duas pedras na espessura, dependendo do tamanho da parede, com as juntas totalmente preenchidas com argamassa.

Ensaio sónicos indiretos foram realizados na face interior da fachada norte, ao longo de três linhas verticais (V1, V2 e V3) e duas horizontais (H1 e H2), numa porção da parede aparentemente em boas condições, a fim de avaliar a consistência da argamassa e estimar a sua influência na velocidade de propagação do impulso sónico. A velocidade de propagação na pedra foi estimada para ter uma comparação. No ensaio foi utilizado um martelo instrumentado, um acelerómetro uniaxial piezoelétrico com domínio igual a  $\pm 5$  g e sensibilidade de 1000 mV/g e um sistema de aquisição com taxa de amostragem igual a 100000 Hz. Devido à presença de juntas e como esperado, a velocidade da onda na pedra resulta maior do que na alvenaria (Figura 8b). O resultado das observações não permitiu identificar uma redução significativa da velocidade de propagação em função da distância entre as medições. As velocidades medidas evidenciam que a alvenaria é de boa qualidade e com juntas preenchidas.

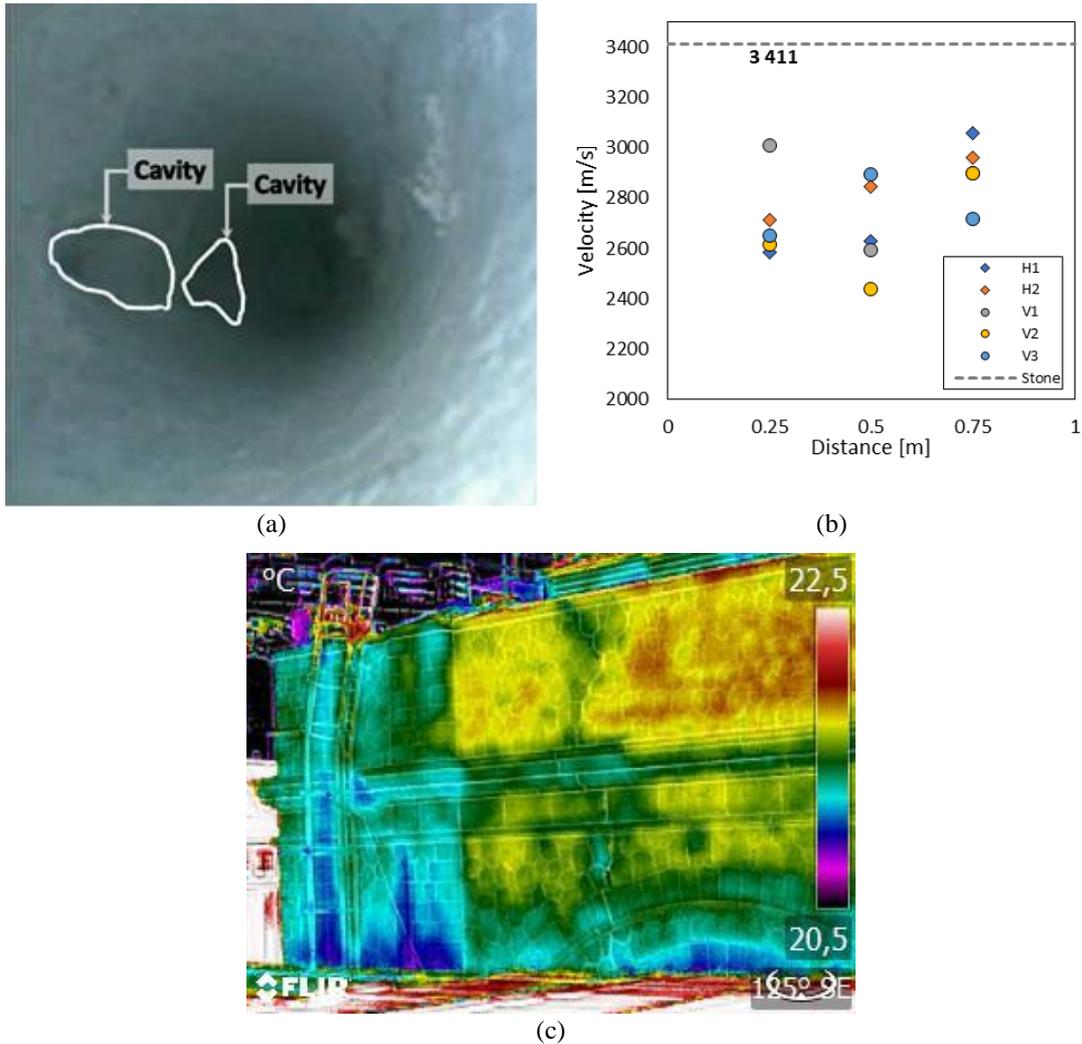


Figura 8: Inspeção com câmara boroscópica em furo (a), velocidade média do impulso sónico na parede (b), imagem dinâmica multiespectral da fachada norte (c)

O resultado da inspeção com câmara termográfica foi afetado pelo gradiente de temperatura insuficiente. As superfícies investigadas apresentam uma distribuição quase uniforme da temperatura. Uma pequena variação encontra-se na fachada norte, provavelmente devido à diferente exposição ao vento e à luz solar. Como é evidente na imagem dinâmica multiespectral (MSX), uma área com temperatura ligeiramente mais baixa corresponde a uma das fendas principais (Figura 8c).

Por fim, foi realizado um ensaio de infiltração de água no Edifício A, para verificar os efeitos da permanência da água nas superfícies horizontais durante a chuva. Dois pequenos reservatórios de água, com cerca de 0.10 m de altura, foram criados isolando uma porção da calha (Figura 9a) e da cornija (Figura 9b). Devido ao bom estado de conservação da calha, não houve ingresso de água no interior neste ponto. De forma bem diferente, toda a água do reservatório na cornija, que apresenta um padrão difuso de fendas, penetrou nas paredes, deixando claras evidências de humidade no exterior e escorrendo extensivamente nas superfícies internas (Figura 10).



Figura 9: Ensaio de infiltração de água: (a) calha; (b) cornija

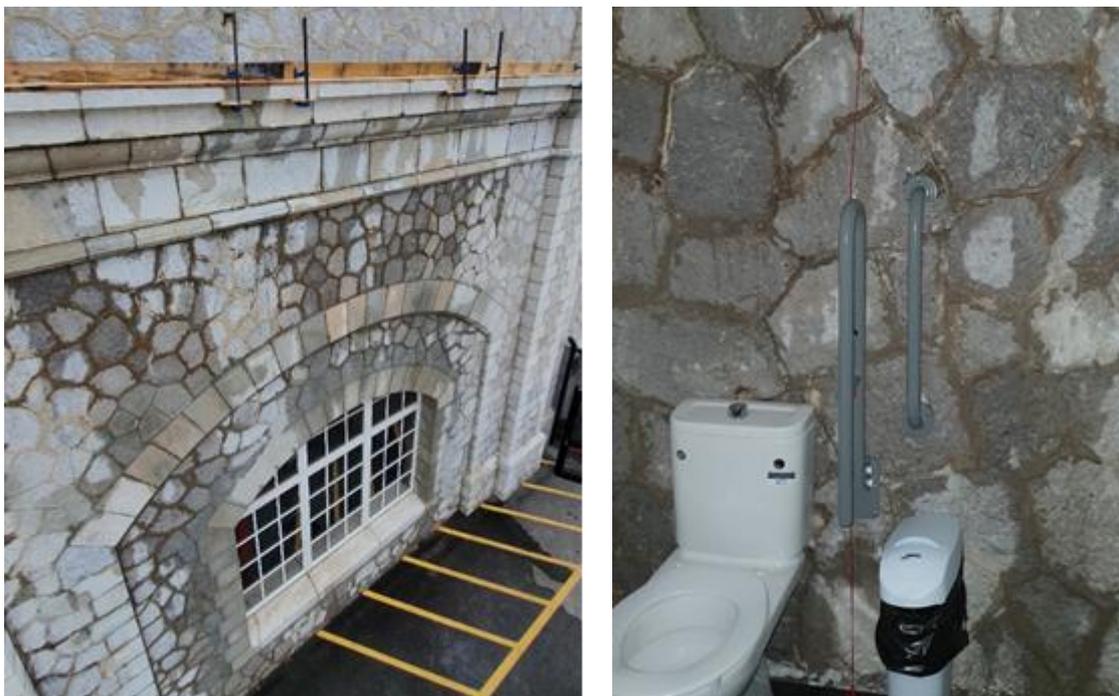


Figura 10: Resultado do ensaio e infiltração de água no interior

### Resultados e recomendações

A inspeção e diagnóstico permitiu concluir que: (a) as paredes de alvenaria não são rebocadas e não podem ser rebocadas, sendo um critério das autoridades locais; (b) a alvenaria é de boa qualidade com juntas preenchidas, embora haja alguma deterioração externa das pedras e da argamassa; (c) as paredes apresentam um padrão de fendas passantes no canto nordeste do Edifício B (devido ao assentamento do solo por uma rutura no sistema de drenagem ou abastecimento de água) e ao lado das janelas na fachada leste (devido à deformação das vigas metálicas sob carga gravitacional, vento, ou dilatação térmica); (d) o coroamento das paredes e as cornijas apresentam um padrão difuso de fissuração.

Para a correção das anomalias que causam a infiltração de água são sugeridas as seguintes medidas não intrusivas, em conformidade com os critérios das autoridades locais para intervenções

no património: (a) injeção das fissuras com argamassa fluída; (b) preenchimento ou refechamento das juntas de alvenaria; (c) instalação de rufos nas superfícies horizontais; (d) implementação de um plano de inspeção e manutenção regular de cobertura, rufos, calhas, caleiras e tubos de queda, pelo menos duas vezes por ano.

## **Conclusão**

No presente trabalho foram descritos os principais resultados da inspeção e diagnóstico realizados em dois edifícios patrimoniais situados no porto de Gibraltar e sujeitos às ações de vento e chuva dirigida. O estudo incluiu o levantamento do dano existente e ensaios no local e permitiu identificar as causas da infiltração de água e humidade na fachada. Por último, apresentaram-se recomendações para a correção das anomalias, em conformidade com os critérios das autoridades locais para intervenções no património.

## **Referências**

- [1] P. Gholamalipour, H. Ge, and T. Stathopoulos, *Wind-driven rain (WDR) loading on building facades: A state-of-the-art review*, *Building and Environment*, vol. 221, (2022) 109314, doi: 10.1016/j.buildenv.2022.109314.
- [2] B. Blocken and J. Carmeliet, *A review of wind-driven rain research in building science*, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 92, no. 13, (2004) 1079–1130, doi: 10.1016/j.jweia.2004.06.003.
- [3] D. Wheeler and J. Martin-Vide, *Rainfall characteristics of Mainland Europe's most southerly stations*, *International Journal of Climatology*, vol. 12, no. 1, (1992) 69–76, doi: 10.1002/joc.3370120107.

## Reabilitação de paredes de tabique

REIS Cristina<sup>1,a</sup>, PINTO Jorge<sup>2</sup>, OLIVEIRA Carlos<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharias, UTAD/Construct/INEGI, Quinta de Prados 5000-801 Vila Real

<sup>2</sup>UTAD/CMAD, Quinta de Prados 5000-801 Vila Real

<sup>3</sup>Instituto Politécnico de Viana do Castelo - Escola Superior de Tecnologia e Gestão - IPVC/INEGI, Viana do Castelo

<sup>a</sup>crisreis@utad.pt

**Palavras-chave:** Reabilitação, Paredes de Tabique, Argamassa, Técnicas.

**Resumo.** Este trabalho de investigação consiste no acompanhamento de um caso de na avaliação da harmonia dos trabalhos de restauro e reabilitação de um edifício antigo, sem por em risco a estabilidade e a preservação de aspetos patrimoniais, arquitetónicos e construtivos, de um edifício antigo com elevado estado de degradação que se encontrava sob projeto de restauração e reabilitação. O edifício em estudo é a Casa do Muro, situada na freguesia de Ourilhe, concelho de Celorico de Basto, pertencente ao distrito de Braga em Portugal. Devido à sua antiguidade, constatou-se que havia paredes de tabique que foram alvo de restauro. Como os materiais empregues e os métodos construtivos utilizados, são do século XVI foi necessário ter alguns cuidados na reabilitação e restauro, nomeadamente nas paredes de tabique.

### Introdução

O objetivo deste estudo é apresentar uma metodologia de restauro e reabilitação aplicada a um monumento histórico em avançado estado de degradação, preservando os aspetos arquitetónicos e sem comprometer a estabilidade da estrutura. Este estudo diz respeito ao restauro da “Casa do Muro” localizada na freguesia de Ourilhe, Celorico de Basto, em Portugal. Este trabalho trata essencialmente de paredes de madeira, elementos em avançado estado de degradação. Estas paredes são geralmente divisórias e paredes de suporte, sendo este tipo de parede normalmente utilizado em obras antigas, representando um importante elemento estrutural.

As paredes de madeira e gesso são obtidas pregando um painel ripado colocado no topo, com a aplicação de um revestimento (argamassa de gesso) em ambas as faces, designadas por “tabique” sendo usadas como paredes divisórias [1]. Este tipo de muro é muito conhecido em Portugal, pois caracteriza toda a construção pombalina em Lisboa conhecida como a “gaiola Pombalina”, da época do “Marquês de Pombal”, conhecida pelo terramoto de 1755 em Lisboa [2].

A intervenção em edifícios antigos são questões que devem evidenciar o respeito pelo fator social, económico e cultural, embora dependa muito do montante disponível para esta intervenção, do conhecimento e sensibilidade dos proprietários e técnicos que trabalham no local [3].

Numa primeira fase, foi feito um estudo histórico deste monumento, quais as técnicas construtivas e os diferentes tipos de degradação dos materiais utilizados. Seguindo-se um diagnóstico dos elementos afetados, principalmente paredes feitas com madeira e gesso. Foram realizados três tipos de diagnóstico: observação visual, técnica de percussão manual e amostragem por extração de carotes. Por último restaurar e reabilitar as paredes de madeira e gesso.

### Localização e história

A obra, objeto deste estudo denominada “Casa do Muro” localiza-se na freguesia de Ourilhe, freguesia de Celorico de Basto, distrito de Braga em Portugal. Tendo em conta os materiais utilizados e os métodos construtivos utilizados, a data de construção da obra em causa poderá ser do século XVI, e com modificações (obras) datadas do século XVIII. Os materiais utilizados na

construção naquela época são essencialmente: madeira, pedra e gesso. Dado o valor patrimonial da estrutura, foram tomadas precauções adicionais durante as várias obras de restauro. As operações de restauro foram precedidas de um diagnóstico do estado de degradação dos vários elementos da construção. A Figura 1 apresenta o monumento histórico objeto deste estudo antes da intervenção que mostra o estado avançado de degradação da estrutura.



Figura 1: Estado de degradação da obra [4]

Segundo Vasco Freitas e al [5] os edifícios antigos são todos aqueles que foram construídos antes da generalização da utilização das estruturas de betão armado que passaram a ser muito frequentes a partir da segunda guerra mundial. Incluem-se neste grupo de edifícios o património monumental, edifícios classificados e o património edificado corrente em que a pedra, a madeira, a cal e o vidro são materiais dominantes, como é o caso deste edifício em estudo.

### **Identificação, caracterização e restauro das paredes de tabique**

O tabique é uma técnica de construção anterior ao século XVII, com largas raízes ou manifestações provinciais, mas que certamente por constituir um processo barato e fácil, continuou a utilizar-se revestido de telhas, lousas ou chapa, para acréscimos trapeiros e outras formas de andares suplementares [5].

A abordagem utilizada consiste em avaliar a degradação gerada pelos agentes atmosféricos e sob o efeito da chuva, particularmente os ciclos de secagem e humedecimento. A madeira é um material sensível à humidade, o que lhe causa variações volumétricas [6]. Estas variações de dimensão geram tensões internas induzidas no material que originam grandes fissuras [7] e consequentemente a degradação do material. A fissuração que surge no material de madeira aumenta a sua capacidade de retenção da humidade, o que promove ataques de agentes bióticos e consequentemente envelhecimento acelerado da estrutura e degradação das suas propriedades mecânicas [8].

A presença de alta humidade associada a ciclos de secagem e humedecimento e variações de temperatura, leva à criação de condições favoráveis para o desenvolvimento de fungos e ataques de insetos, em especial de cupins [9]. A Figura 2 mostra o estado de degradação das paredes de tabique.



Figura 2: Estado de degradação das paredes [4]

Pretende-se restaurar e reabilitar as paredes de madeira e gesso “tabique”. Nesta obra primeiro identificaram-se várias paredes que possuíam frescos. Nas paredes desprovidas de frescos, o restauro foi feito em particular em elementos de madeira e substituindo os elementos irreparáveis por novos, usando técnicas antigas de montagem com conexões modernas, como parafusos de aço inoxidável para fazer a conexão entre elementos novos e antigos, como se pode observar na Figura 3.



Figura 3: Estado de degradação e reparação das paredes de tabique [4]

Relativamente aos elementos de madeira que apresentavam degradação acentuada, procedeu-se à aplicação de uma camada de reboco de barro. Constatou-se que existiam paredes de madeira sobre as quais havia aplicação de frescos, que se pretenderam restaurar, tendo para o efeito contratado pessoal especializado para o efeito. Foi utilizada uma película plástica para proteger a pintura histórica, bem como as portas e janelas.

### **Orientações de restauro de habitações antigas**

Apresentam-se algumas sugestões e indicações que ajudam na orientação sobre o tipo de intervenção de restauro a fazer [8]:

- Procurar respeitar o passado na medida do possível, preservando os materiais existentes, quando as soluções e materiais usados sejam de carácter moderno;
- Compreender a utilidade e necessidade de futuras intervenções, respeitando as antecedentes e o contexto em que aconteceram;

- Deixar indicações que permitam perceber onde e quais as intervenções que se realizaram nos edifícios;
- Evitar soluções de carácter excessivamente atual e pouco conhecidas e avaliadas;
- Usar sempre que possíveis ligações reversíveis;
- Evitar as intervenções mais radicais e modernizadoras de um ponto de vista arquitetónico, que se traduzam por soluções altamente destruidoras e marcantes nos edifícios, procurando deixar o mínimo possível de alterações à solução encontrada nos momentos do restauro.

## Conclusão

Como em todas as obras de restauro e reabilitação de monumentos históricos, é importante manter ao máximo as características originais. Um dos primeiros objetivos do processo de reabilitação diz respeito à análise detalhada por inspeção visual. Sem esquecer a importância de preservar os valores arquitetónicos, construtivos e históricos de um monumento. Esta inspeção deve ser exaustiva de forma a detetar áreas críticas e elementos construtivos que necessitem de maior intervenção [10].

Salienta-se que uma intervenção de restauro e reabilitação deve ser realizada por pessoas de diferentes especialidades técnicas, para uma observação atenta, envolvendo arquitetos, engenheiros, e também questões históricas e sociais [11]. Para a reabilitação do edifício foram realizadas tarefas de desmonte e demolição de elementos que se encontravam em elevado estado de degradação, mas que podiam ser tratados e reutilizáveis na mesma obra, nomeadamente, de elementos em madeira (pavimentos, coberturas, janelas, portas, etc.) e reutilização das pedras das alvenarias demolidas. Os trabalhos de demolição de algumas paredes de alvenarias em pedra ou em paredes de tabiques foram efetuados, pelo método tradicional manual, muito controlado, devido à instabilidade estrutural, degradação e fragilidade, mas também devido a aspetos ligados ao projeto de reabilitação, como por exemplo alteração dos usos dos compartimentos. Salienta-se que neste trabalho foram destacados os aspetos relacionados fundamentalmente com a reabilitação das paredes de tabique (constituídas por madeira e reboco), muito frequentes naquela época de construção. Para o efeito não se usaram nem ensaios destrutivos, nem não destrutivos. Utilizaram-se apenas técnicas de avaliação por observação visual, motivada pela existência de frescos originais que tinham que ser preservados e que se encontravam escondidos com camadas sucessivas de tinta.

A conclusão mais importante deste trabalho pode ser vista na figura 4 que mostra que, graças à abordagem seguida, os trabalhos de restauro são realizados respeitando a autenticidade deste monumento datado do século XVI. Quando os trabalhos de restauração começaram, os frescos históricos das paredes não eram absolutamente visíveis. Graças a um diagnóstico detalhado realizado com muito cuidado, os aspetos arquitetónicos e construtivos deste monumento foram preservados, e os frescos foram atualizados, restaurados e preservados como se pode observar na figura 4.

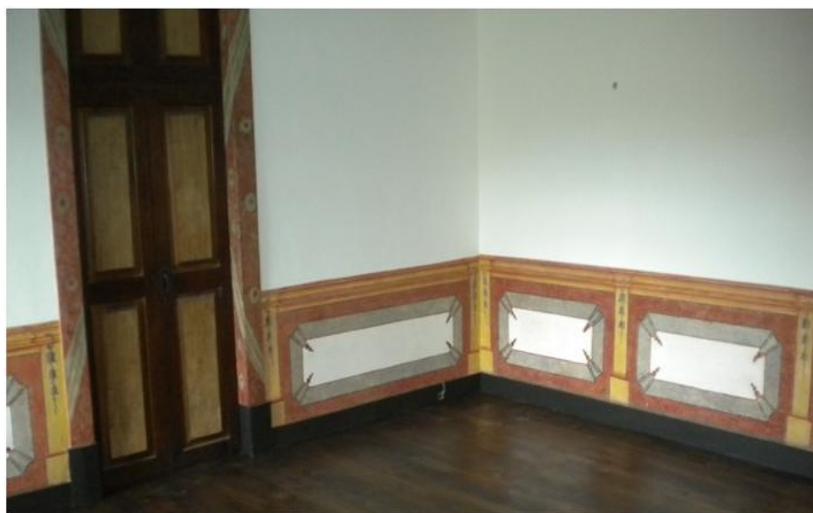


Figura 4: Paredes de madeira restauradas colocando os frescos à vista [4]

## 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] Técnicas de restauro, <http://www.paulojones.com/tecnicas/tabique.htm>, em 18/03/2014.
- [2] Saraiva Flório F. M., *Tipificação de soluções de reabilitação de paredes de madeira em edifícios antigos*, Thèse de Master, construções civis, Université de Porto, École d'Ingénieur, 2010.
- [3] Costa, A., Guedes, J.M., Varum, H., *Structural Rehabilitation of Old Buildings*, Building Pathology and Rehabilitation (2014) Vol. 2. Springer, Berlin.
- [4] Reis Christina, Oliveira Carlos, Mieirol Márcio, Marwen Bouasker and Muzahim Al-Mukhtar (2014). *Restauration et réhabilitation d'un monument historique du XVIIe siècle*. 32èmes Rencontres Universitaires de Génie Civil. Université de Orléans, École Polytechnique de Orléans, França Junho de 2014.
- [5] Vasco Peixoto de Freitas – *Manual de apoio ao Projecto de reabilitação de edifícios antigos*, Ordem dos Engenheiros Região Norte, ISBN 978-972-99918-7-5, 2012.
- [6] Ilharco de Moura Pinho Dias Tiago, *Pavimentos de madeira em edifícios antigos, diagnostico e intervenção estrutural*. Thèse de Master em reabilitação do património edificado, Université de Porto, École d'Ingénieur, 2008.
- [7] Botelho, J., *Avaliação não destructiva na capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos*. Thèse de Master em reabilitação do património edificado, Université de Porto, École d'Ingénieur, 2006.
- [8] Faria, *Reabilitação de coberturas em madeira de edifícios históricos. A intervenção no património; práticas de conservação e reabilitação*, Université de Porto, École d'Ingénieur, 2006.
- [9] Appleton, J., *Reabilitação de Edifícios Antigos – Patologias e tecnologias de intervenção*. Edições Orion, Amadora, 2003.
- [10] Ornelas E., Ilharco T., Guedes, J. Paupério, E, Costa A., *A inspecção como instrumento de decisão. Apresentação de um caso prático num edifício com valor patrimonial*. PATORREB 2006, Porto.
- [11] Ilharco T., Guedes J.M., Paupério E., Arêde A., Costa A.G., *Analysis and diagnosis of timber structures of Porto historical centre old buildings*. Taylor & Francis Group. London, 2008.

## **Avaliação experimental de tensões geradas num sistema de colagem de cerâmica sob ação de gradientes térmicos**

SILVA Luis<sup>1,a</sup>, SEQUEIRA Pedro<sup>1,b</sup>, FLORES Andreia<sup>2,c</sup>, VIRIATO Nuno<sup>2,d</sup>  
MELO Francisco<sup>2,e</sup> e VAZ Mário<sup>3,f</sup>

<sup>1</sup>Saint-Gobain Portugal S.A., Zona Industrial Taboeira, 3800-055, Aveiro, Portugal

<sup>2</sup>INEGI, Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial, Rua Dr. Roberto Frias, 400, 4200-465 Porto, Portugal

<sup>3</sup>FEUP, Faculdade de Engenharia Mecânica, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal

<sup>a</sup>luis.silva@saint-gobain.com, <sup>b</sup>pedro.sequeira@saint-gobain.com, <sup>c</sup>aflores@inegi.up.pt,  
<sup>d</sup>nviriato@inegi.up.pt, <sup>e</sup>fmelo@inegi.up.pt, <sup>f</sup>gmavaz@fe.up.pt.

**Palavras-chave:** Colagem Cerâmica, Variação Térmica, Avaliação Experimental de Tensões.

**Resumo.** O sucesso da aplicação de cerâmica em fachadas e pavimentos exteriores depende, entre vários fatores, de uma correta relação e compatibilidade mecânica, química e física entre os todos os elementos envolvidos, a saber, o suporte, a cerâmica e as argamassas. Quando exposto a variação térmica, fatores como a dimensão e cor dos cerâmicos, tipologia do suporte e dimensão de junta adotada assumem especial relevância ao nível das tensões obtidas. Qualquer investigação bibliográfica apresenta imediatamente um conjunto de estudos de simulação numérica capazes de evidenciar e comprovar estes efeitos. Um desses estudos recentemente publicado, avalia as tensões geradas em contexto de aplicação com suportes como reboco, betão ou um isolante térmico, apresentando exaustivamente resultados de combinações de vários elementos do sistema que parecem adequar-se e comprovar as exigências e experiências em contexto real. O mesmo estudo sublinha a importância de se caracterizar experimentalmente as tensões, pelo menos para alguns dos casos mencionados, como método de validação dos resultados obtidos na simulação numérica. O presente trabalho aborda este desafio por definir e executar uma metodologia experimental que permita obter as tensões exercidas, em diferentes componentes, por ação de um gradiente térmico sobre um sistema cerâmico colado em condições próximas dos modelos teóricos. Admite-se que a comparação de resultados obtidos permitirá fazer uma reflexão ao grau de aplicabilidade da metodologia teórica desenvolvida e eventuais necessidades de afinação da mesma.

### **Introdução**

A colagem de cerâmica é uma técnica ancestral e, talvez por isso, tendencialmente subestimada do ponto de vista de requisitos técnicos capazes de assegurar um desempenho durável. Porém, a verdade é que a utilização de cerâmica como elemento de revestimento só se apresenta como uma solução milenar porque se tem conseguido reinventar, sobretudo a nível estético. Com efeito, o sucesso de tal adaptação continua a garantir as vantagens inerentes à utilização de cerâmica, como durabilidade, resistência ao choque, resistência química e ao fogo, sem perder o potencial de inovação estética. Por tudo isso, quaisquer que sejam as tendências de construção gerais em fachadas e pavimentos, é frequente a necessidade de garantir que estes sejam capazes de receber elementos cerâmicos como revestimento. Por exemplo, os desafios mais recentes, implicam a garantia de compatibilidade de aplicação de cerâmica em contextos com suportes mais flexíveis (menores módulos de elasticidade, como sistemas ETICS (External Thermal Insulation Composite System), placas de madeira, gesso ou cimento perfiladas) e ambientes mais exigentes ao nível de variações térmicas, como é o caso de pavimentos radiantes ou resultado de condições climáticas mais agressivas em ambientes exteriores como fachadas ou terraços. Também, a própria cerâmica no seu caminho de reinvenção, cria desafios adicionais à sua fixação como é o caso de elementos de

dimensões substancialmente maiores (superiores a 1x1m), cores mais escuras ou espessuras substancialmente menores como é o caso da lâmina cerâmica [1-3].

Por outro lado, no que respeita às normas e guias de recomendação de fixação por colagem de cerâmica, facilmente se percebe que foram construídas com base em pressupostos que estão ultrapassados, tornando-se em entraves ao desenvolvimento de soluções inovadoras ou, no mínimo, desconsideradas por não justificarem os motivos pelos quais apresentam tais limitações (admite-se que a normalização existente tenha por base estudos técnicos ou experiência acumulada mas nem sempre é uma informação de fácil acesso). Ou então, resultam em documentos que, não obstante serem aplicáveis ao mesmo tipo de necessidade, apresentam perspectivas/abordagens completamente distintas dos requisitos a cumprir. Por exemplo, a comparação entre as colas reativas, classe R, da EN 12004-1, ANSI 118-3 ou ISO 13007-1 e o caso da ISO 14448 (*Low modulus adhesives for exterior tile finishing*) que é suposto apresentarem desempenhos superiores em aplicação mais difíceis como fachadas, porém apresentando requisitos técnicos diferentes ou até antagónicos [4-10].

Face ao exposto, uma resposta adequada deve contemplar uma análise do princípio de tudo, a saber, o nível de tensões realmente geradas num sistema de colagem. No passado, vários trabalhos foram publicados para diversos contextos, mas, como esperado, dificilmente representam a variedade de situações como diferentes tipologias de suporte, dimensões de cerâmicos, largura de juntas entre cerâmicos, entre outros. Com efeito, é quase impraticável o planeamento e execução de trabalhos experimentais que abordem todas as variáveis possíveis [11-13].

Foi com base nesta dificuldade que, recentemente, se procedeu a um estudo teórico, publicado, que avalia, por simulação numérica, as tensões geradas em contexto de aplicação com suportes como: reboco, betão ou um isolante térmico (EPS 100), apresentando exaustivamente resultados de combinações de vários elementos do sistema que parecem adequar-se e comprovar a necessidade de experiências em contexto real. O estudo apresenta a distribuição de tensões geradas por expansão térmica num sistema de colagem de elementos cerâmicos. A quantificação do campo de tais tensões foi efetuada por recurso a modelação por elementos finitos em que a distribuição de tensões de origem térmica se efetua de modo incremental, assumindo um gradiente de temperaturas entre a face exposta e a massa interna do material base, ligação cerâmico/argamassa-cola. O modelo numérico permitiu analisar as tensões de acordo com o critério de von Mises, o que se enquadra no comportamento de cerâmicos na construção. A aplicação do modelo foi realizada considerando duas juntas entre cerâmico de 1 e 6mm e várias dimensões de cerâmico (20x20cm; 30x30cm; 40x40cm; 60x60cm; 90x90cm; 120x120cm; 30x60cm; 30x90cm; 30x120cm). Para as combinações indicadas, fez-se a determinação das tensões normais à superfície (resultado de uma diferença de temperatura entre a superfície do cerâmico e a zona de contacto com a argamassa-cola), das tensões de corte (devidas à dilatação superficial entre o cerâmico e o material de colagem e de base e que podem apresentar gradientes elevados nos contornos de fronteira) e das tensões de von Mises (obtido a partir da resultante das anteriores e, portanto, alvo específico do estudo). O valor das tensões foi obtido para a superfície do elemento cerâmico, para a interface entre o cerâmico e a argamassa-cola e para a própria argamassa-cola, sendo esta última a única considerada para o trabalho em questão. Finalmente, as tensões foram ainda determinadas relativamente à zona de extremidade do cerâmico e na zona central. Os resultados obtidos apresentam variáveis como a distância entre cerâmicos e a dimensão dos mesmos que condicionam fortemente as tensões resultantes ao nível da argamassa-cola, inclusive com valores acima da própria aderência que as mesmas podem proporcionar. Por isso, é admissível considerar limitações de colagem de elementos cerâmicos em situações de aplicação em exterior, como fachadas e pavimentos, em função da sua dimensão e da relação com a junta de preenchimento. Com efeito, os resultados de simulação numérica apontam para dimensões máximas de 60x60cm coladas com argamassas com aderências entre 1 e 2N/mm<sup>2</sup>. Finalmente, a publicação também sublinha a importância de caracterizar experimentalmente as tensões, pelo menos para alguns dos casos mencionados, como método de validação dos resultados obtidos na simulação numérica. Aborda também a problemática das tensões ao nível da camada de base no caso de suporte de ETICS, assumindo o seu módulo de

Young para os cálculos, com resultados muito superiores à coesão interna do EPS o que leva a questionar se a consideração do módulo não deverá ser antes controlada pelo próprio EPS ou pela conjugação entre ambas [14,15].

Considerando os resultados obtidos por simulação numérica como uma ferramenta de excelência para apreciação de possibilidades de execução de obra, é naturalmente imperativo aferir e validar os resultados obtidos. A metodologia que se considera adequada para o efeito é baseada em ensaios experimentais especificamente equivalentes aos pressupostos do estudo numérico realizado. Esse é o motivo pelo qual se decidiu proceder ao estudo indicado no presente trabalho, que apresenta um sumário da metodologia experimental realizada para o efeito e os principais resultados obtidos para duas situações a escala semi-laboratorial, um caso com utilização de suporte de reboco e um caso com utilização de um suporte de isolamento térmico pelo exterior (ETICS) com base em polistireno EPS 100 como material isolante. No final, apresentam-se as tensões resultantes em comparação com os valores obtidos a partir do modelo numérico e faz-se uma análise crítica aos resultados obtidos.

### **Metodologia experimental**

A metodologia experimental adotada consistiu na construção de painéis com áreas aproximadas de  $2 \times 2 \text{m}^2$  que apresentam um conjunto de materiais aplicados segundo os esquemas de condições reais relativamente a fachadas expostas a condições ambientais diversas. A escolha de materiais na realização dos testes, dimensão de cerâmicos, distância entre cerâmicos, variação térmica de  $30^\circ\text{C}$  e locais de avaliação de temperaturas, deformações e tensões, tiveram em consideração a maior proximidade possível aos pressupostos do modelo teórico previamente trabalhado [14,15].

Considerando o objetivo de avaliação de uma parede com suporte de reboco e outra com ETICS, construíram-se 2 amostras distintas:

**Amostra 1.** Relativa à situação de suporte em reboco:

- Alvenaria de bloco BT25 (espessura 25cm) revestida por argamassa de reboco com 1,5cm de espessura (classe CSIII);

- Revestimento:

- a) Cerâmico do tipo B1a, cor escura ( $\alpha > 0,7$ ), dimensão 60x60cm colado com argamassa-cola, classe C2S, por técnica de colagem dupla (penteado 8x8);
- b) Junta entre cerâmicos de 6mm, preenchida por argamassa CG2W (cor cinza).

**Amostra 2.** Relativa à situação de suporte em ETICS

- Alvenaria de bloco BT25 (espessura 25cm) revestida por argamassa de reboco com 1,5cm de espessura (classe CSIII), seguida de aplicação de sistema ETICS composto por placas EPS100\_6cm, coladas ao reboco com argamassa de colagem com aderência sobre betão de 1MPa, colagem contínua (penteado 8x8), argamassa de camada de base do tipo CSII + rede fibra de vidro, 160g/m<sup>2</sup>, abertura 4x4mm, numa espessura pelo menos de 5mm;

- Revestimento:

- a) Cerâmico do tipo B1a, cor escura ( $\alpha > 0,7$ ), dimensão 60x60cm colado com argamassa-cola, classe C2S, por técnica de colagem dupla (penteado 8x8);
- b) Junta entre cerâmicos de 6mm, preenchida por argamassa CG2W (cor cinza).

A medição de temperaturas foi realizada nos seguintes locais (Figura 1):

- na superfície externa do cerâmico, na zona central, em ambas as amostras (zona A);
- na superfície interna do cerâmico, entre esta e a argamassa-cola (zona B), em ambas as amostras;
- na superfície do reboco, entre esta e a argamassa-cola (zona C), no caso da amostra 1; e na superfície da camada de base reforçada, entre esta e a argamassa-cola, no caso da amostra 2.

Para as tensões, foram avaliadas nos seguintes locais (Figura 1):

- na superfície interna do cerâmico, entre esta e a argamassa-cola (zona B), em ambas as amostras;
- na superfície do reboco, entre esta e argamassa-cola (zona C), no caso da amostra 1; e na superfície da camada de base reforçada, entre esta e a argamassa-cola, no caso da amostra 2.

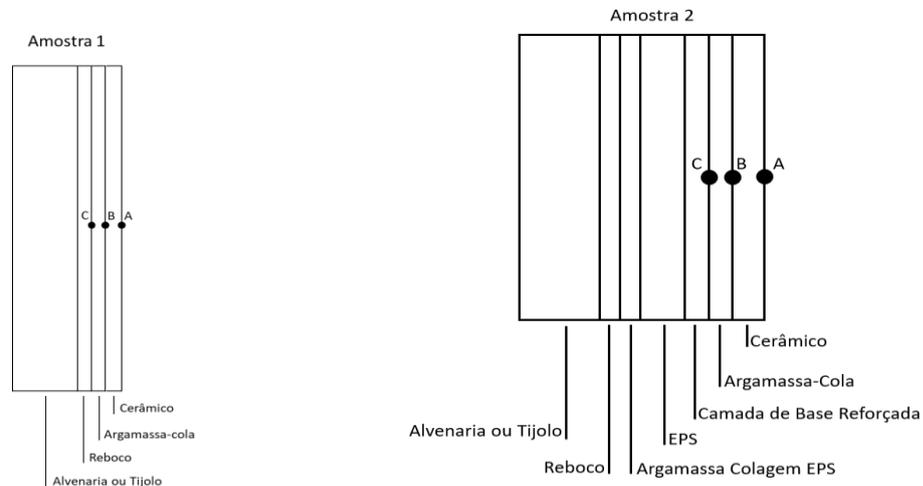


Figura 1: Seção lateral da amostra 1 e amostra 2, com zonas de colocação de termopares e extensômetros

Assumindo o painel de dimensões 2x2m, preenchido com cerâmicos de 60x60cm e juntas de 6mm, as zonas instrumentadas (central e extremidade) são dispostas nas amostras segundo as indicações das figuras 2 e 3.

Para cada amostra foram utilizados no total 8 rosetas de extensômetros (modelo 1-RY81-3/120 da empresa HBM) e 7 sensores de temperatura (termopares). Cada área, A0 e A1, e de acordo com o apresentado na Figura 2, os cerâmicos foram instrumentados na sua superfície interna com 2 rosetas de extensômetros e 2 termopares, ambos assinalados a vermelho na Figura 3. Na face externa do cerâmico, e no seu centro, colocou-se um segundo termopar. Adicionalmente, colocou-se um termopar extra na face externa do cerâmico da área A0, por forma a controlar a temperatura no interior da estufa. Para melhor compreensão da localização dos sensores em cada cerâmico, a roseta de extensômetros e o termopar colocados no centro dos cerâmicos (C), são referentes à Zona Central (ZC); enquanto a roseta de extensômetros colocada na extremidade do cerâmico, ou seja, num dos cantos, refere-se à Zona Extremidade (ZE) (Figura 3). As áreas e as designações também se aplicam ao reboco, para a Amostra 1 e para a camada de base reforçada, no caso da amostra 2.



Figura 2: Disposição das áreas instrumentadas nas amostras 1 e 2

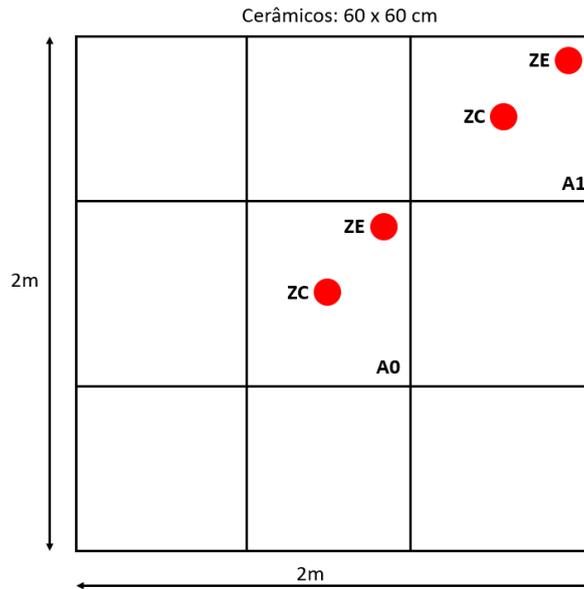


Figura 3: Áreas e referências para a localização dos sensores: ZC – zona central; ZE – zona extremidade

Para a aquisição dos sinais foram utilizados os respectivos módulos para extensometria (NI 9235) e temperatura (NI 9213) e o chassis cDAQ NI 9188, da empresa National Instruments. Para o registo dos sinais foi utilizado o programa Labview Signal Express também da empresa National Instruments. Todas as medições foram realizadas a uma frequência de amostragem de 5Hz. Após 48h em condições a temperatura ambiente, os painéis são sujeitos a 5 ciclos térmicos de 24h, com incremento da temperatura durante 1h até aos 50°C, permanecendo a essa temperatura durante as 7h seguintes. Após o total de 8h, a temperatura desce durante 2h até aos 20°C e permanece durante as 14h seguintes à temperatura de 20°C, terminando o ciclo. Apenas a face respetiva ao painel cerâmico é exposta às temperaturas indicadas de forma a promover o gradiente térmico ao longo de toda a seção da amostra. A Figura 4 apresenta a representação esquemática de cada ciclo.

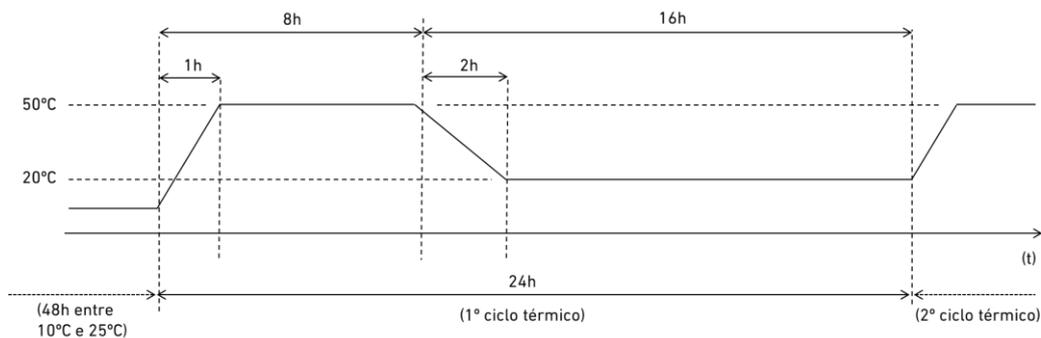


Figura 4: Representação esquemática dos ciclos térmicos realizados

No que respeita à realização do aquecimento, foi construída uma estufa que permite o aquecimento de todos os cerâmicos em simultâneo e que possibilita o arrefecimento posterior. A Figura 5 apresenta os sistemas de aquecimento e arrefecimento utilizados durante a realização dos ciclos. Salienta-se que o aquecimento foi controlado através de um controlador PID com um termopar colocado na face externa do cerâmico central. O arrefecimento, para a temperatura ambiente no ciclo térmico, foi conseguido através de ventiladores ajustados para atingir 20°C no intervalo de tempo de 2h.



Figura 5: Sistemas de aquecimento (esquerda) e arrefecimento (centro e direita) usados para as duas amostras

## Resultados e discussão

Para o cálculo das tensões, foi necessário conhecer as propriedades mecânicas de cada um dos componentes. Por conseguinte, para ambas as amostras foram consideradas as propriedades mecânicas que se apresentam na Tabela 1 e os pressupostos utilizados no estudo teórico [14,15].

Tabela 1: Propriedades mecânicas dos materiais [14,15]

Material	Módulo de Young [GPa]	Coefficiente de Poisson	Espessura Média Aplicada [mm]
Cerâmico - C	32	0,2	10
Reboco- R	8	0,2	15
Argamassa-Cola - Adesivo	8	0,2	6
Camada de Base Reforçada - CBR*	8	0,2	6

\*valor sem reforço da malha de fibra de vidro (160g/m<sup>2</sup>, abertura 4x4mm e tratamento antialcalino)

As figuras 15 a 16 apresentam os resultados das temperaturas, deformações e tensões para a parede normal (com reboco) e parede de sistema ETICS (com EPS100 de 6cm), para os vários ciclos realizados, evidenciando as tendências em fases de aquecimento e arrefecimento. A determinação das tensões geradas na argamassa-cola, foi realizada a partir das deformações medidas experimentalmente nos cerâmicos, assumindo que são equivalentes e aplicando o módulo de Young e coeficiente de Poisson respetivos à argamassa-cola indicado na tabela 1. De notar que, para a situação relativa às tensões na zona da camada de base reforçada (CBR), admitindo que o modelo teórico assume discutivelmente o módulo da camada de base isolada, a partir de um ensaio de flexão a 3 pontos, fez-se a determinação do módulo de Young do conjunto EPS 100 (60mm) com camada de base reforçada numa espessura de 6mm, cujo resultado foi de 25MPa (contra os 8GPa da argamassa), próximo do valor do próprio EPS 100 (50MPa) pelo que se decidiu assumir este valor referenciado para o cálculo das tensões.

Para cada ensaio, foi sempre realizado o ajuste de zero a todas as rosetas de extensómetros. Posteriormente, os sinais das tensões foram filtrados utilizando-se um filtro passa baixo Butterworth de 3ª ordem, com uma frequência de corte de 0,001Hz. Os valores de tensão são apresentados em MPa e as temperaturas em °C.

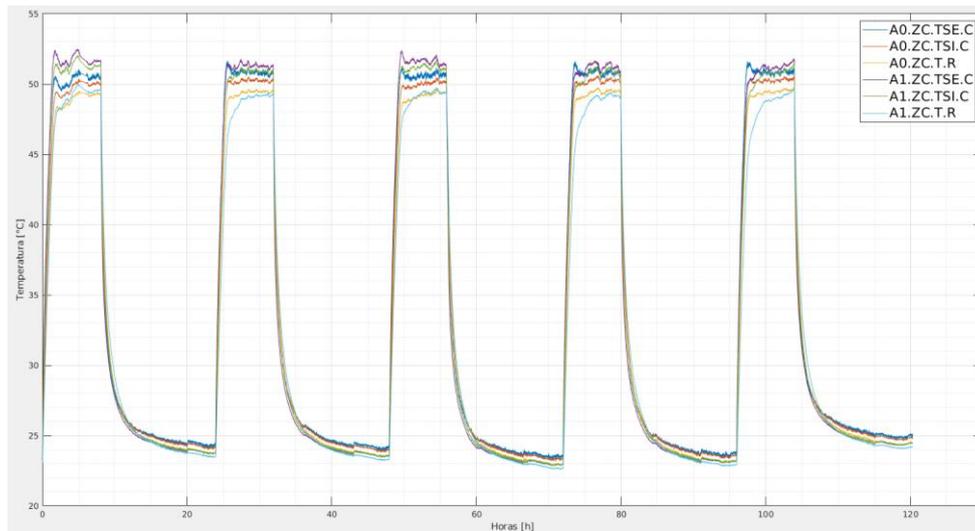


Figura 6: Evolução das temperaturas no cerâmico (C), reboco (R) e argamassa-cola (AC), amostra 1, áreas A0 e A1

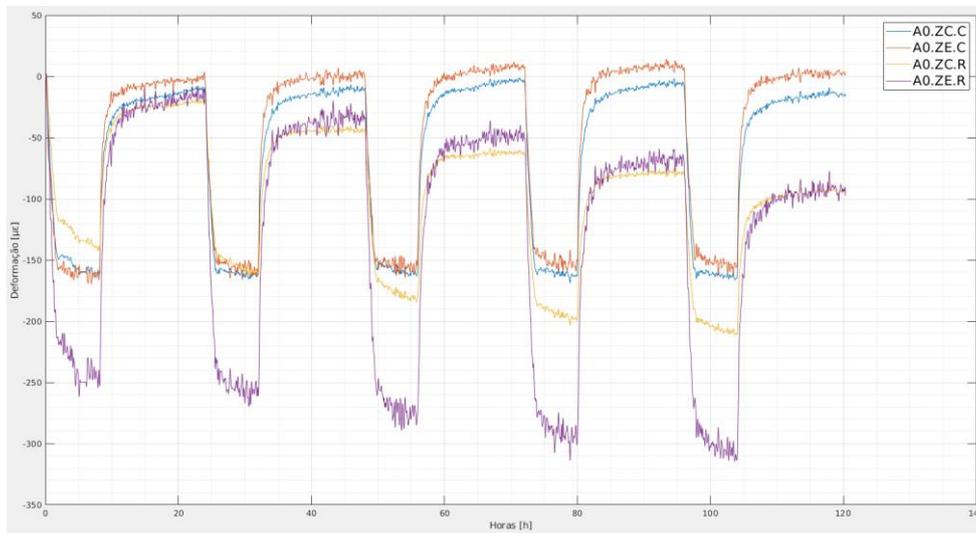


Figura 7: Evolução das deformações no cerâmico (C) e reboco (R), amostra 1, área A0

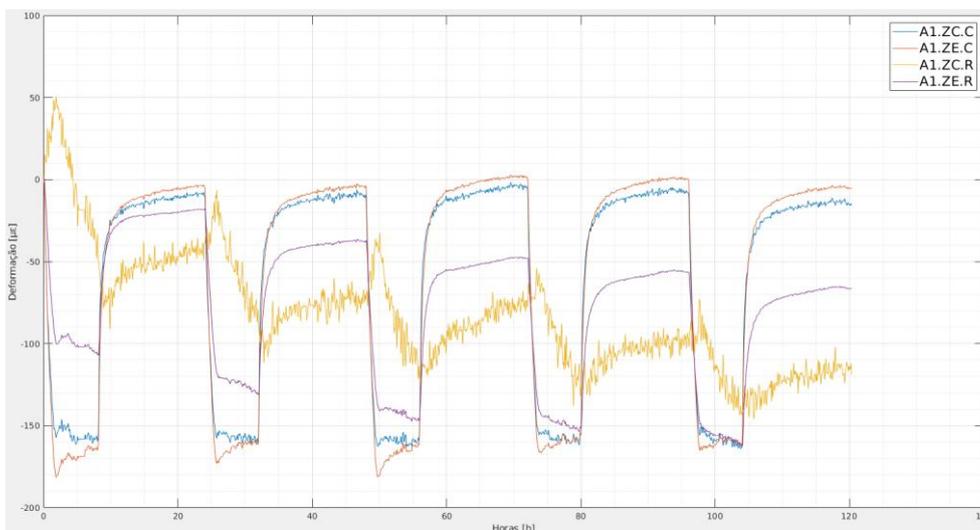


Figura 8: Evolução das deformações no cerâmico (C) e reboco (R), amostra 1, área A1

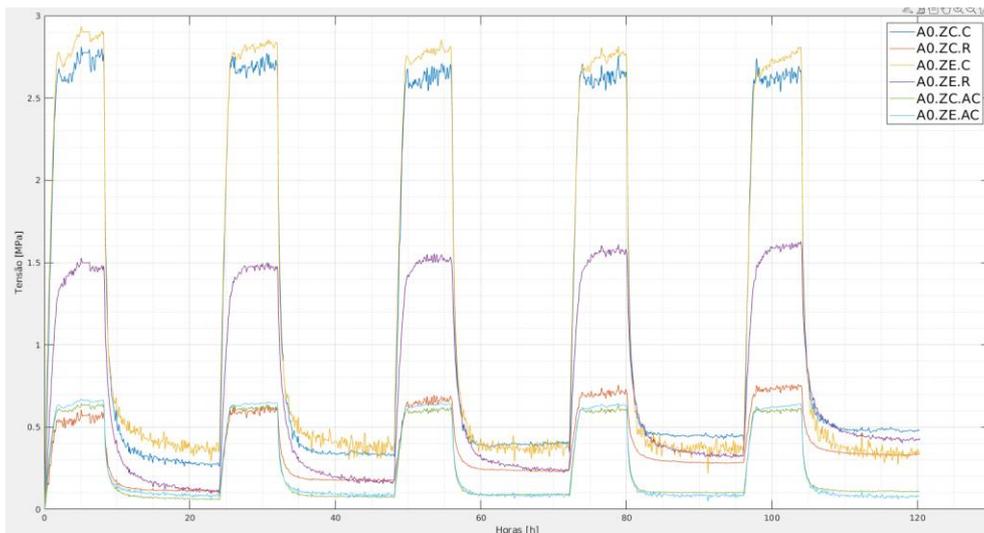


Figura 9: Evolução das tensões equivalentes no cerâmico (C), reboco (R) e argamassa-cola (AC), amostra 1, área A0

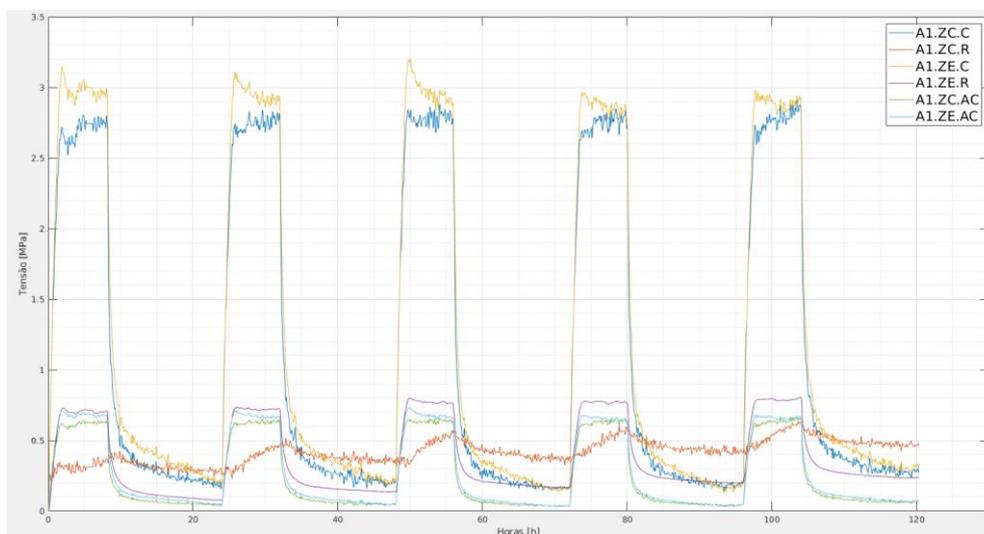


Figura 10: Evolução das tensões equivalentes no cerâmico (C), reboco (R) e argamassa-cola (AC), amostra 1, área A1

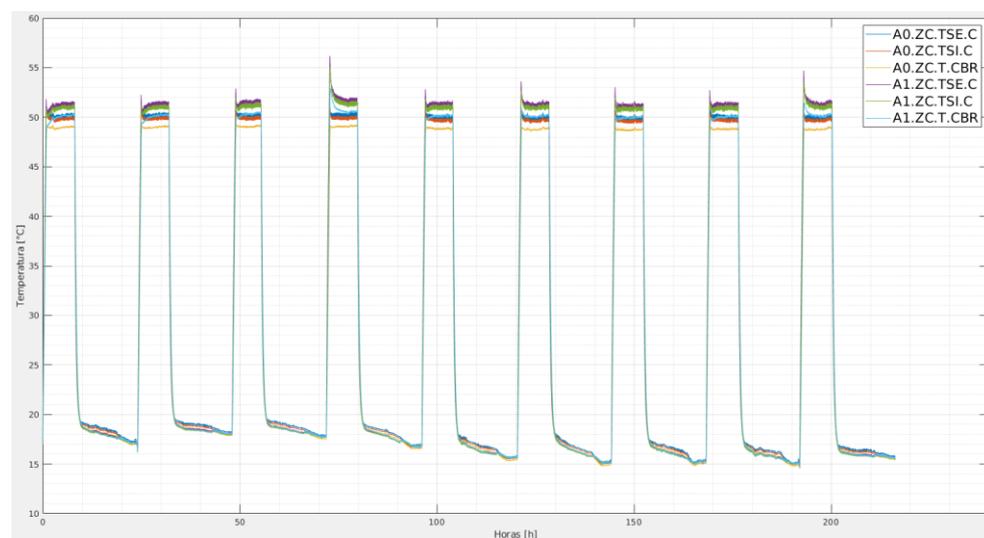


Figura 11: Evolução da temperatura no cerâmico (C) e camada de base reforçada (CBR), amostra 2, áreas A0 e/ou A1

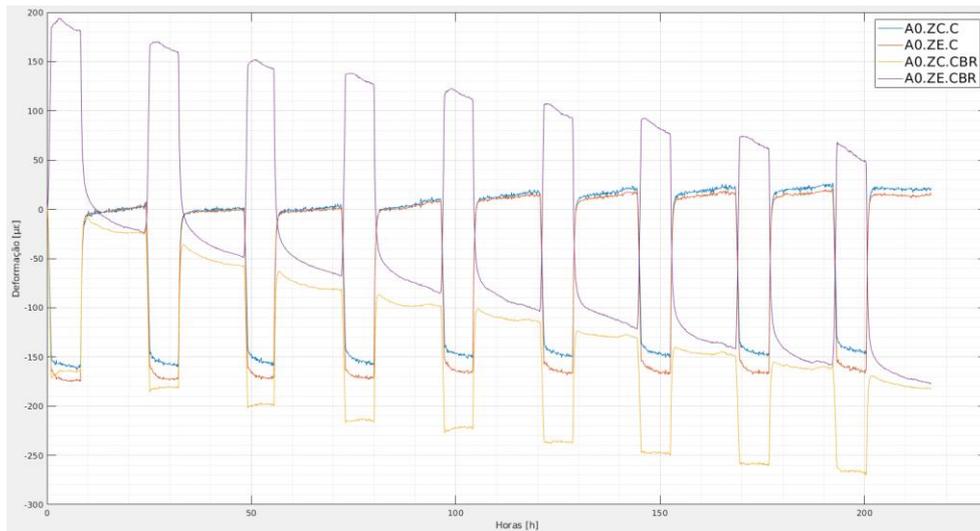


Figura 12: Evolução das deformações no cerâmico (C) e camada de base reforçada (CBR), amostra 2, área A0

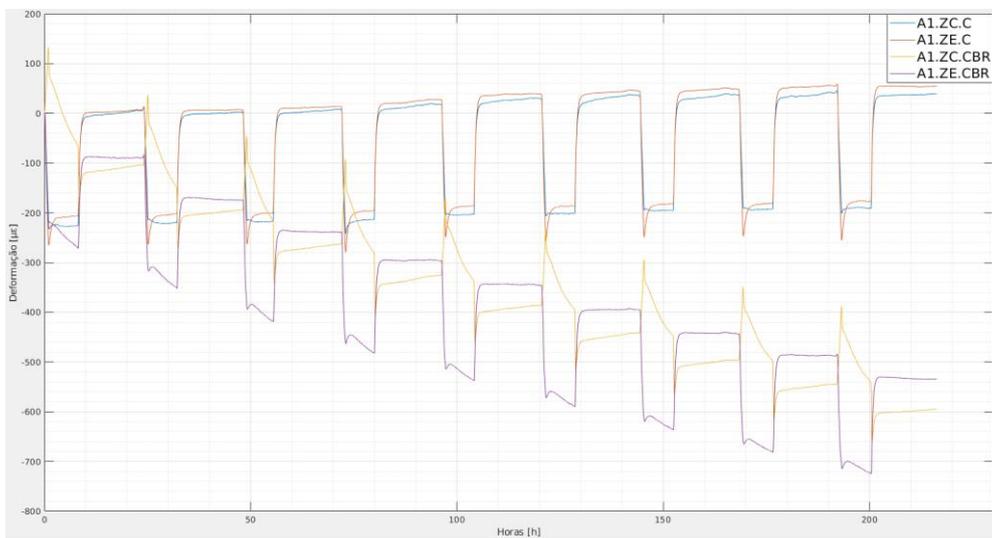


Figura 13: Evolução das deformações no cerâmico (C) e camada de base reforçada (CBR), amostra 2, área A1

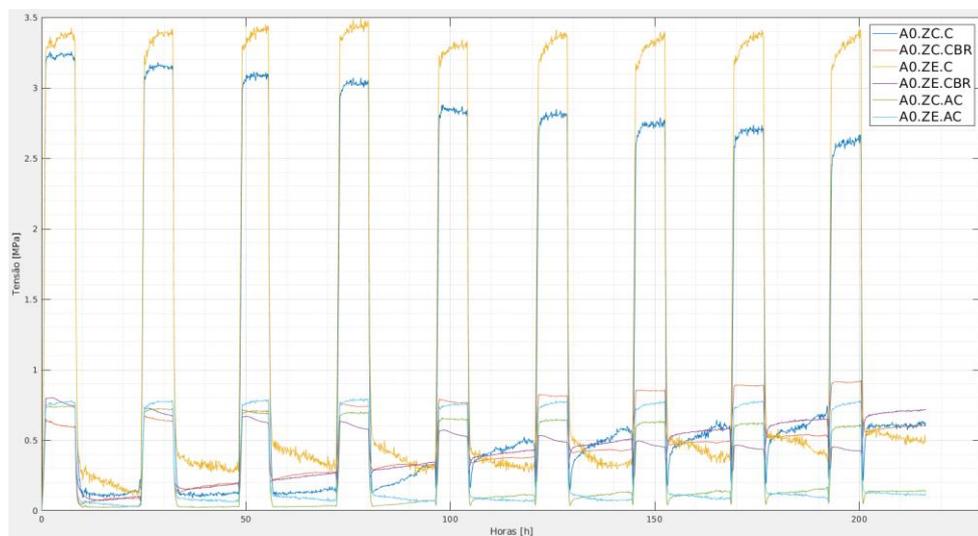


Figura 14: Evolução das tensões equivalentes no cerâmico (C), camada de base reforçada (CBR) e argamassa-cola (AC), amostra 2, área A0

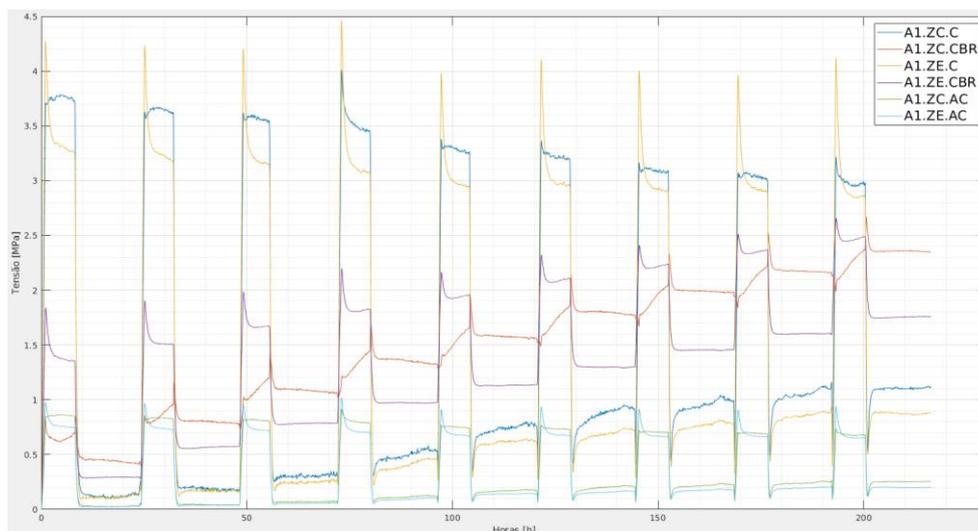


Figura 15: Evolução das tensões equivalentes no cerâmico (C), camada de base reforçada (CBR) e argamassa-cola (AC), amostra 2, área A1

A Tabela 2, relativa à amostra 1, apresenta a comparação das tensões determinadas a partir dos modelos teórico e experimental indicando, para a maioria dos casos, diferenças insignificantes, inferiores a 10%, o que sugere que os pressupostos do modelo teórico são bastante aceitáveis e capazes de refletir com precisão o comportamento do sistema ao nível dos diferentes componentes. Ainda assim, verificou-se um caso para o reboco (zona central do cerâmico) com diferenças de 50% que merece uma análise com mais detalhe de interpretação.

Tabela 2: Resultados relativos às tensões obtidas a partir da simulação numérica e da metodologia experimental aplicada, para a amostra 1 (referente ao caso de suporte com reboco)

Metodologia/Zona avaliação/elemento	Zona extremidade do cerâmico		Zona central do cerâmico	
	Adesivo	Reboco	Adesivo	Reboco
Simulação Numérica [14,15]	0,63	1,31	0,61	1,31
Medição experimental	0,66	1,52	0,66	0,65

No caso particular da amostra 2 (suporte em EPS 100), os resultados relativos às deformações (e, conseqüentemente, das tensões) indicam tendências crescentes ou decrescentes, conforme a zona de análise, ao contrário dos resultados da amostra 1 (suporte de reboco) cujos resultados apresentam estabilidade logo a partir dos primeiros ciclos. Uma vez verificada a situação para a amostra 2, foi realizado novo ensaio com duração total de 30 ciclos, ou seja, 30 dias. Da análise dos resultados, e para o caso EPS, verifica-se uma tendência para estabilização apenas a partir do 25º ciclo, conforme refletido na Figura 16 e Figura 17, que apresentam essas tendências de forma mais visível, por apresentarem o valor específico de tensões obtido para cada ciclo, relativamente à argamassa de camada de base e argamassa-cola.

Este comportamento torna a interpretação dos resultados mais complexa, uma vez que levanta questões sobre que valor assumir como melhor indicador do sistema. Por isso, a tabela 3 apresenta alguns casos com 2 valores experimentais, o primeiro relativo à média dos 30 ciclos e, o segundo, relativo ao valor máximo medido e que corresponde ao valor da fase de estabilização. No final, os 2 valores não são muito diferentes, mas a comparação com os valores das tensões durante os primeiros ciclos, revela diferenças significativas, em casos como a CBR, em mais de 100% (Figura 16).

Finalmente, também é relevante notar que os valores das tensões obtidos para a argamassa de camada de base são significativamente menores que a resistência interna do EPS (superior a 0,15MPa [16]), desde que se assuma o módulo de Young do conjunto EPS 100/Rede de reforço/camada de base, o que pode ajudar a explicar porque não se observam roturas em contexto real e confirmar que é acertado assumir o módulo de Young relativo ao EPS 100 e não à camada de

base. Já ao nível das tensões na argamassa-cola, notam-se valores similares ao caso da amostra 1 ou até superiores.

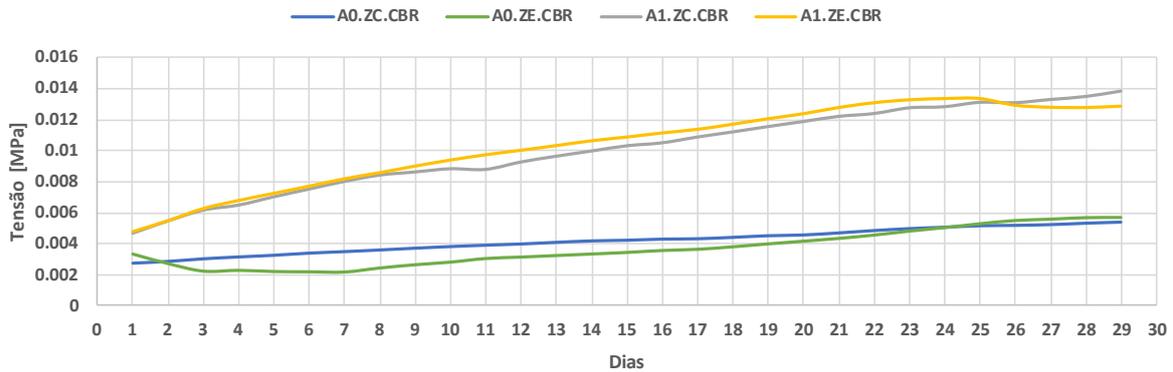


Figura 16: Evolução das tensões equivalentes na camada de base reforçada (CBR), durante o aquecimento de 30 ciclos, para as áreas A0 e A1

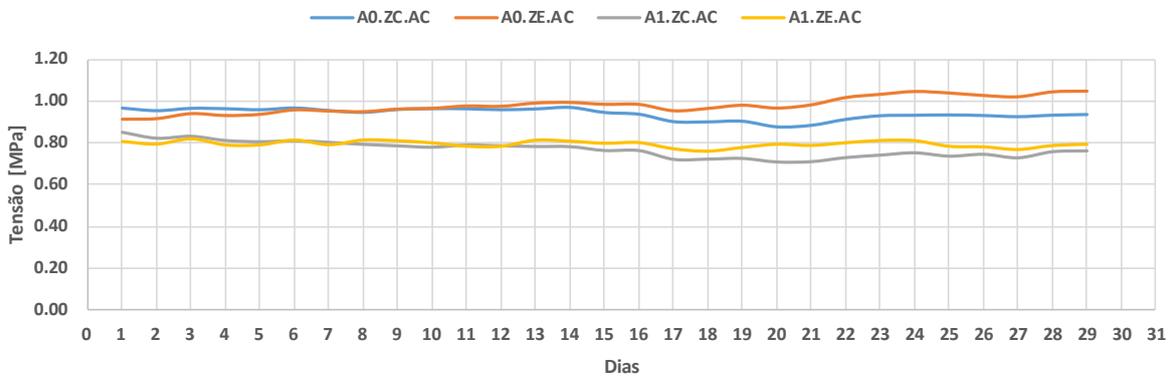


Figura 17: Evolução das tensões equivalentes na argamassa-cola (AC), durante o aquecimento de 30 ciclos, para as áreas A0 e A1

Ainda relativamente à amostra 2, equivalente ao suporte em EPS 100, a comparação de resultados entre a simulação teórica e a determinação experimental revela que os valores experimentais são tendencialmente superiores para o caso da argamassa-cola e na ordem de 0,3MPa. Esta diferença é próxima de 50% face ao valor da simulação, que se poderá considerar aceitável uma vez que se enquadram dentro de um intervalo que classifica uma argamassa-cola dentro de mesma classe de exigência. Ainda assim, é uma diferença considerável que deve merecer uma análise detalhada de interpretação sobre o seu significado, provavelmente ao nível dos pressupostos adotados na simulação numérica. Ao contrário, a comparação de valores obtidos para a argamassa de camada de base reforçada apresenta diferenças menores (entre 20 e 40%), ainda justificando alguma ponderação ao nível desses mesmos pressupostos. Ao nível da simulação teórica, não existem resultados adotando um módulo de Young menor, pelo que não se pode fazer uma comparação nestas condições, ainda que se admita que não será muito díspar em relação às conclusões anteriores.

Tabela 3: Resultados relativos às tensões obtidas a partir da simulação numérica e da metodologia experimental aplicada, para a amostra 2 (referente ao caso de suporte com sistema ETICS)

Metodologia/Zona avaliação/elemento	Zona extremidade do cerâmico			Zona central do cerâmico		
	Adesivo	CBR <sup>(1)</sup>	CBR <sup>(2)</sup>	Adesivo	CBR <sup>(1)</sup>	CBR <sup>(2)</sup>
Simulação numérica [14,15]	0,61	0,61	n.t	0,61	0,61	n.t
Medição experimental <sup>(3)</sup>	0,98; 1,05	0,43	0,004; 0,01	0,94; 0,97	0,72	0,004; 0,01

<sup>(1)</sup> Assumindo módulo de elasticidade da camada de base (8GPa); <sup>(2)</sup> Assumindo módulo de elasticidade de uma combinação de EPS 100 e camada de base (25MPa); <sup>(3)</sup> Para os casos onde aparecem 2 valores, o 1º valor corresponde ao valor máximo medido e o 2º ao valor médio.

## Conclusão

Este trabalho tem como objetivo principal a determinação experimental de tensões geradas num sistema de cerâmica colada em suportes de reboco e EPS 100, a partir de uma metodologia experimental que permita obter as deformações exercidas, em diferentes componentes, por ação de um gradiente térmico. Posteriormente, pretende-se que as medições realizadas possam servir de validação ou contribuir para melhorias de um procedimento numérico, teórico, trabalhado anteriormente pelos autores, mas que carece, efetivamente, de prova experimental.

Os resultados obtidos a partir dos ensaios experimentais indicam valores de tensões equivalentes aos valores teóricos propostos, sobretudo quando o suporte considerado é reboco aplicado sobre uma alvenaria de bloco de betão leve, sugerindo que a elevada rigidez de todo o sistema contribui para uma estabilidade de todos os componentes ao longo de todos os ciclos aplicados e, por isso, os pressupostos adotados no modelo numérico, acabam por se adaptar sem surpresa.

Por outro lado, os resultados também demonstram que para o contexto de aplicação sobre um suporte em EPS 100 (sistema ETICS) existem discrepâncias significativas entre os valores teóricos e experimentais, sendo os últimos tendencialmente superiores em mais de 50%. Na verdade, o comportamento das deformações ao longo dos ciclos não teve a estabilidade que o sistema anterior apresentou. Antes, observou-se uma tendência a um incremento das deformações e tensões durante o aquecimento ao longo do tempo de ensaio, até se atingir uma estabilização após 25 ciclos. Em alguma dessa trajetória, é possível observar valores de tensões similares aos propostos pelo modelo teórico, sugerindo que o mesmo carece de fator de estabilização, provavelmente associado a materiais mais compressíveis como o próprio EPS 100.

## Referências

- [1] Ceramic tile on the forefront of architecture, a 10 Year Retrospective Words: Richard P. Goldberg AIA, CSI, NCARB, Architect-Professional Consultant International, LLC (PROCON).
- [2] G. Toplicic-Curcic, D. Grdic, N. Ristic, Z. Grdic, *Ceramic façade claddings as an element of sustainable development*, Architecture and Civil Engineering, Vol. 13, nº 3, (2015) 219-231.
- [3] S. Malanho, R. Veiga, *Performance of external thermal insulating composite system (ETICS) with finishing ceramic tiles*, 12th DBMC, vol. IV, Porto, (2011) 1959-1966.
- [4] Cahiers des Prescriptions Techniques d'exécution, CSTB, *Revetements de murs extérieurs en carreaux céramiques ou analogues collés au moyen de mortiers-colles en travaux neufs*, Mai 2006.
- [5] Cahiers des Prescriptions Techniques d'exécution, CSTB, *Revêtements de sols intérieurs et extérieurs en carreaux céramiques ou analogues collés au moyen de mortiers-colles dans les locaux P3 au plus en travaux neufs*, Mai 2006.

- [6] UNI 11493-1:2016 Piastrellature ceramiche a pavimento e a parete - Parte 1: Istruzioni per la progettazione, l'installazione e la manutenzione.
- [7] EN 12004-1:2017- Adhesives for ceramic tiles - Part 1: Requirements, assessment and verification of constancy of performance, classification and marking, CEN 2017.
- [8] ISO 13007-1, Ceramic tiles-Grouts and adhesives- part 1: Terms, definitions and specifications for adhesives, 2010.
- [9] American National Standard Specifications for The Installation of Ceramic Tile (ANSI), Material & Installation Standards, TCNA- Tile Council of North America, Inc., 2013.
- [10] ISO 14448, Low modulus adhesives for exterior tile finishing, 1st edition, 2016.
- [11] M.Y.L Chew., *Factors affecting ceramic tile adhesion for external cladding*. Construction and Building Materials, 13 (5), (1999) 293-296.
- [12] J. K. Flexiberger, *Stresses in the composite system: tile, fixing mortar, base*, in General Conferences, Vol. II, pág. P.BB-191, Qualicer 2006, Castellon (Spain).
- [13] M. Abreu, M., *Descolamento e fendilhação em revestimentos cerâmicos*, 3º Encore, LNEC, 1801-1090, 2003, Lisboa.
- [14] L. Silva, P. Sequeira, F. Melo and C. Lopes, *Evaluation of the von mises stress as a function of elastic modulus of the tile adhesive and joint grout mortars*, 12th European Adhesion Conference and 4th Luso-Brazilian Conference on Adhesion and Adhesives, IST-University of Lisbon, September 2018.
- [15] L. Silva, P. Sequeira, F. Melo and C. Lopes, *The Evaluation of Von Mises Stress Field in Bonded Tiling Ceramics as Function of the Elastic Modulus of the Tile-Adhesive and Joint Grout Mortars*, Proc IMechE Part L:J Materials: Design and Applications 0(0) (2020) 1–8.
- [16] V. Pereira, P. Sequeira, N. Vieira e L. Silva, *Fixação de elementos cerâmicos no sistema ETICS. Pormenores que fazem a diferença*, 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra, Portugal, março 2012.

## Conjunto residencial horizontal e o uso da linha de balanço: Um estudo de caso

FREDERICE Rodrigo Felício<sup>1,a</sup>, FERREIRA Tamiris Capellaro<sup>2,b</sup>, VIVAN André Luiz<sup>3,c</sup> e PALIARI José Carlos<sup>4,d</sup>

<sup>1,2,4</sup>Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luís (SP-310), Km 235 - São Carlos - São Paulo - CEP 13565-905 - Caixa Postal 676, Brasil

<sup>3</sup>Instituto de Recursos Naturais - Universidade Federal de Itajubá - Av. B P S, 1303 - Pinheirinho, Itajubá - MG, CEP 37500-903, Brasil

<sup>a</sup>rodrigo.frederice@gmail.com, <sup>b</sup>tamiris.capellaro@outlook.com, <sup>c</sup>andreluizvivan@gmail.com, <sup>d</sup>jpaliari@ufscar.br

**Palavras-chave:** Planejamento, Cronograma, Linha de Balanço.

**Resumo.** Devido às mudanças no cenário econômico brasileiro nos últimos anos, houve um grande aumento da competitividade na construção civil. Este contexto gerou a necessidade de as empresas do setor buscarem prazos mais assertivos, ou seja, um cronograma de obra bem formulado tornou-se uma ferramenta essencial para o aumento da produtividade e da lucratividade da empresa. Sendo assim, o objetivo do trabalho foi elaborar e simular diversos cenários de um cronograma de obra para um conjunto residencial horizontal, utilizando como representação gráfica o método da Linha de Balanço. Foi feito um estudo de caso em uma construtora no interior de São Paulo - Brasil, aliado à pesquisa documental de seus processos construtivos e à coleta de dados de produtividade em tabelas comerciais. Foi possível observar como o método da Linha de Balanço traz, de maneira bastante visual, diversas informações do planejamento e das equipes de trabalho, bem como a possibilidade de comprimir o cronograma de obra de maneira prática. Por meio da otimização dos ritmos de produção, foram identificadas reduções de prazo de até nove meses, diminuição do efetivo de obra de até 15% e aumento significativo no pico de funcionários, impactando diretamente os custos de obra.

### Introdução

No Brasil, o setor da construção civil é de grande importância no panorama socioeconômico, porém, devido à grande instabilidade econômica, o setor entrou em declínio a partir de 2014, sendo que, desde então, apresentou crescimento negativo em todos os anos seguintes até 2020, com exceção de 2018, segundo a CBIC [1].

Neste cenário, a transformação da forma de pensar tornou-se inevitável para que as empresas da construção civil pudessem atenuar os efeitos da crise econômica. Para Mattos [2], o processo de planejamento e controle da produção de forma eficaz e eficiente cumpre um papel fundamental na probabilidade de sucesso das atividades da empresa.

A escolha do método de planejamento depende das características e objetivos do projeto. Para obras consideradas repetitivas, como edifícios de múltiplos pavimentos, condomínios horizontais, rodovias, linhas de transmissão, entre outras, o método tradicional de planejamento em redes pode resultar em cronogramas extensos e difíceis de serem gerenciados [3]. Segundo Mattos [2], os modelos de rede já tiveram bastante sucesso no planejamento e controle de projetos, mas não são tão adequados aos projetos de caráter repetitivo. No caso do método PERT/CPM, cada atividade é considerada um evento único e, mesmo com o nivelamento, os recursos podem ficar ociosos entre um evento e outro, problema que pode se multiplicar em obras repetitivas [4].

Diante desta dificuldade, o método da Linha de Balanço surgiu, sendo mais adequado para projetos onde há grande repetição de atividades [5]. Este método consiste na elaboração de um gráfico que representa as unidades de repetição dos trabalhos (espaço) e o tempo, sendo assim possível identificar a localização de cada equipe e o fluxo de trabalho [6]. O formato gráfico da

ferramenta traz vantagens como uma visualização mais transparente da produção e da duração das atividades, suas interferências com as tarefas futuras, bem como a agilidade na identificação de possibilidades de otimização das equipes, convertendo-se em reduções de prazo e custo [7].

Entretanto, esta forma de planejamento ainda é pouco utilizada pelo setor brasileiro, em decorrência da falta de qualificação e de maturidade gerencial dos profissionais envolvidos no processo de planejamento [8]. Assim, demonstrar a montagem do cronograma por meio da Linha de Balanço é essencial para que as vantagens do método possam ser difundidas e empregadas em mais obras.

O objetivo principal do trabalho é elaborar e simular diversos cenários de um planejamento de longo prazo (cronograma de obra) para um conjunto residencial horizontal, utilizando como representação gráfica o método de linhas de balanço para identificar as vantagens e desvantagens de cada cenário.

## Revisão bibliográfica

**Planejamento.** O planejamento pode ser dividido em estratégico (longo prazo), tático (médio prazo) e operacional (curto prazo) [9, 10]. O planejamento de longo prazo engloba todo o período da obra, tendo como objetivo gerar seu plano inicial [11]. Este planejamento envolve as decisões com relação às principais fases de construção, plano de ataque, *layout* do canteiro, fluxo de recursos, definição de equipes e a demanda de trabalho [12, 13].

Já o planejamento de médio prazo considera uma janela móvel de tempo, geralmente de 3 semanas a 3 meses, em que as atividades do plano mestre, contemplados por este período, são mais bem detalhadas [14, 15]. É neste momento que as restrições dos pacotes de trabalho são analisadas, possibilitando a tomada de ações contra problemas que poderiam dificultar ou impedir a conclusão dos trabalhos das equipes de produção [14, 16]. O planejamento de curto prazo consiste na passagem das atividades, que tiveram suas restrições eliminadas, para o nível operacional. São realizadas reuniões, normalmente semanais, nas quais os líderes das equipes assumem o compromisso de execução das tarefas planejadas [14, 17].

**Incertezas e *buffers*.** Por ser uma ferramenta que visa representar eventos futuros, o planejamento é caracterizado por incertezas que podem resultar na variabilidade das durações e dos resultados do projeto. De acordo com Kenley e Seppanen [4], as incertezas podem estar relacionadas aos pré-requisitos de produção, às mobilizações, ao ritmo de produção, às quantidades, à disponibilidade de recursos, ao local do empreendimento, à qualidade ou às condições meteorológicas.

Portanto, para proteger o projeto do dinamismo causado pelas incertezas, a indústria da construção utiliza os “*buffers*”. Eles são “recursos amortecedores” (como tempo, custo ou espaço físico), introduzidos propositalmente como um componente da conexão lógica entre duas tarefas visando absorver possíveis distúrbios entre elas [18, 19, 20].

A utilização de *buffers* traz diversos benefícios ao cronograma, pois protege o projeto no nível da atividade. Apesar do seu uso resultar no aumento da duração da tarefa ou do projeto, trata-se de um aumento bem fundamentado, tornando o cronograma mais consistente e confiável [21].

**Métodos de planejamento.** Diversos autores classificam os métodos de planejamento na construção em duas categorias principais: planejamento baseado em atividades (PBA) e planejamento baseado em locais (PBL) [4, 22, 8]. Ainda segundo estes pesquisadores, o principal contraste entre ambos está na forma como o projeto de construção é abordado. No PBA, também conhecido como modelo tradicional, o projeto é decomposto em atividades ou pacotes de entrega. Enquanto no PBL, é utilizada a divisão do empreendimento em locais ou unidades de produção.

Consequentemente, os cronogramas gerados pelos métodos são distintos. O diagrama gerado pelo PBA consiste em uma lista de atividades distribuídas pelo tempo, comumente em formato de diagrama de precedências ou gráfico de barras. Os representantes desta abordagem são o CPM e o PERT (*Program Evaluation and Review Technique*). Já no PBL, o cronograma apresenta as tarefas que percorrem os locais ao longo do tempo. O método mais conhecido deste tipo de planejamento é o da Linha de Balanço.

**Linha de balanço.** A Linha de Balanço teve origem na década de 40, derivada da indústria de manufatura. Este método só passou a ser mais utilizado na construção civil a partir da década 60, com o intuito de agilizar a construção de moradias em cidades europeias devastadas pela guerra [23].

A Linha de Balanço é um método essencialmente gráfico. De acordo com Alves *et al.* [24], trata-se de um diagrama que representa o tempo no eixo horizontal, as unidades de repetição no eixo vertical e o ritmo das atividades (inclinação das linhas). A Linha de Balanço é uma ferramenta poderosa, em que é possível identificar quem (os recursos alocados) faz o que (atividade), quando (duração, início e fim) e onde (localidade). Os passos para sua implantação podem ser listados como: escolha da unidade de repetição; definição das atividades e dependências; cálculo das equipes e duração das atividades; montagem das linhas; otimização do cronograma [4, 6, 11].

Devido à facilidade gráfica de identificar essas informações, a grande vantagem da utilização da linha de balanço é permitir maior agilidade no manuseio das informações, resultando em uma forte ferramenta de comunicação, planejamento e controle no canteiro de obras [25, 6].

## Método

Para a realização da pesquisa, optou-se por um estudo de caso, que consiste na escolha de um objeto de pesquisa restrito, com o objetivo de buscar um detalhamento aprofundado do assunto [26].

Este estudo foi realizado em uma construtora e incorporadora de médio porte sediada na cidade de Piracicaba, interior do estado de São Paulo, Brasil. Ela está presente em diversas cidades do estado, com produtos verticais e horizontais, voltados principalmente ao público de média e baixa renda.

Inicialmente, foram adquiridas informações como a planta urbanística, desenhos arquitetônicos das habitações, data de início e prazo total da obra. Em seguida, desenvolveu-se o plano de ataque da obra, ou seja, a estratégia de execução, buscando dividir o empreendimento em zonas de trabalho que correspondessem às unidades de repetição da Linha de Balanço. Também foram obtidos dados envolvendo a gestão do cronograma, como as atividades a serem desenvolvidas e o seu sequenciamento, por meio de documentos e dados de projetos análogos.

Posteriormente, as durações das atividades foram obtidas por meio de projetos análogos já realizados na construtora. Com essas durações, baseadas em índices de produtividade retirados da Tabela de Composição de Preços para Orçamento (TCPO) [27] ou do Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices (SINAPI) [28], determinou-se o número de funcionários de cada equipe. Foram consideradas equipes independentes para cada uma das atividades.

Na sequência, utilizou-se a Linha de Balanço para a elaboração do cronograma do projeto, sendo a montagem das linhas operacionalizada pelo *software Agilean Planner Freemium*. Finalizado o cronograma, foi construído o histograma de funcionários da obra. Por fim, se realizou a otimização do cronograma por meio de simulações de cenários, que consistiu na análise dos ritmos das linhas. Assim, as equipes foram redimensionadas para comprimir o cronograma conforme as premissas adotadas em cada cenário. Para cada um deles foi construído o histograma a fim de analisar a quantidade de funcionários alocados e comparar com a situação inicial da etapa anterior.

## Resultados

**Execução da obra.** O estudo de caso se baseia em um loteamento de casas a ser implantado no município de Nova Odessa, no estado de São Paulo, Brasil. Este será composto por 242 lotes, sendo 17 comerciais e 225 residenciais. Nestes últimos, serão construídas residências de 55,45 m<sup>2</sup>, compostas por cozinha, sala, 2 quartos e um banheiro. Segundo a construtora, o tempo máximo de obra previsto pela viabilidade do empreendimento é de 14 meses, sendo o início planejado para março de 2022.

Como o método da Linha de Balanço é baseado em localidade, é importante que se defina a estratégia de execução do empreendimento. A Figura 1 representa a sequência dos lotes residenciais nos quais as equipes desenvolverão suas atividades. O início dos serviços foi representado na

imagem pelo círculo e o fim pela ponta da seta, portanto os serviços começarão na quadra I, seguirão em ordem pelas quadras A, B, C, D, E, F, G e encerrarão na H.

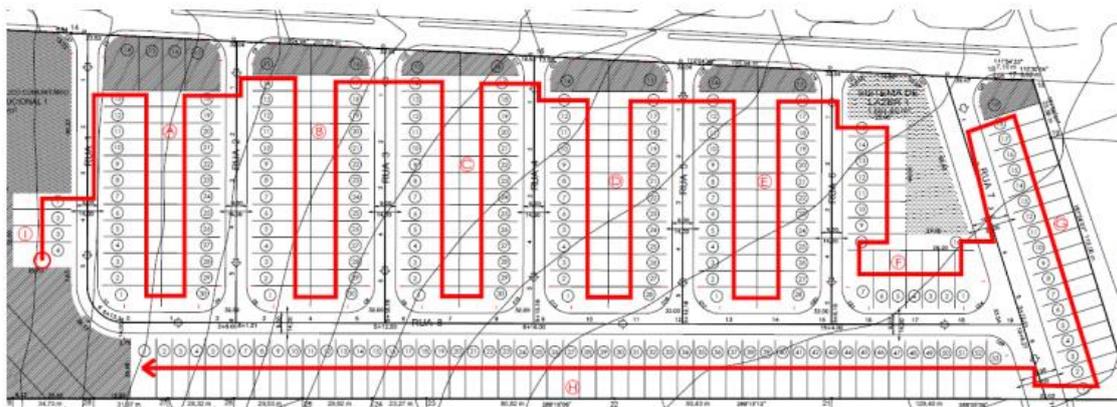


Figura 1: Fluxo de atividades na obra

Fonte: Os autores.

Devido ao tamanho reduzido das residências, as atividades desenvolvidas na obra são muito rápidas, sendo assim faz-se necessário adotar uma unidade de repetição composta por um grupo de casas, para que o planejamento não fique muito minucioso e de difícil compreensão. Desta forma, optou-se por utilizar um conjunto de 15 casas como unidade de repetição. Com esta divisão, o empreendimento ficou separado em 15 lotes de repetição, contendo 15 casas cada.

As atividades realizadas em uma unidade habitacional são padronizadas e possuem um sequenciamento pré-definido. O sequenciamento padrão da empresa foi adaptado e representado utilizando o método do diagrama de precedência, conforme mostra a Figura 2. No total são 35 serviços desenvolvidos em uma unidade, que podem ocorrer sequencialmente ou em paralelo.

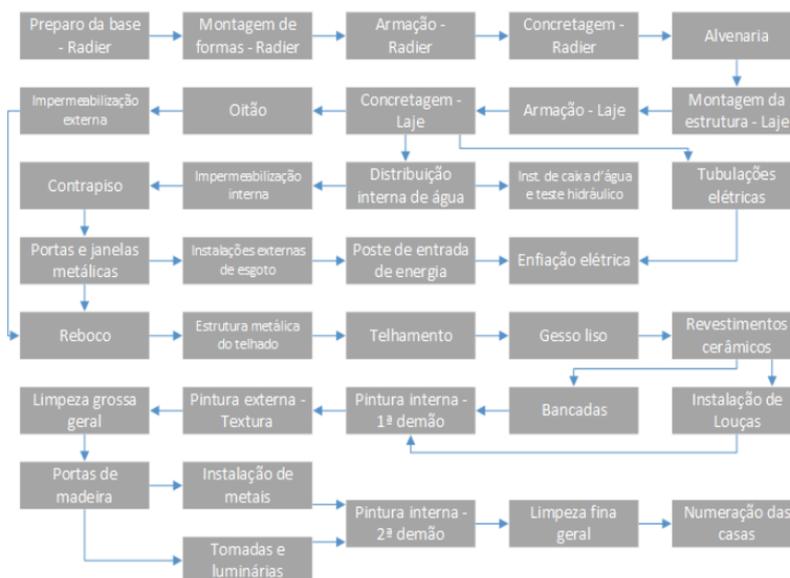


Figura 2: Diagrama de precedência das atividades

Fonte: Os autores.

**Duração das atividades e recursos necessários.** Para determinar os recursos necessários, foram inicialmente levantadas as quantidades de cada serviço de uma unidade habitacional. Em seguida, essas quantidades foram multiplicadas pelo número de casas do lote de repetição. A produtividade foi obtida por meio das tabelas TCPO [27] e SINAPI [28].

Para o cálculo da duração de cada equipe básica, considerou-se que a sua produtividade é igual à produtividade do operário principal (operário = oficial), pois é ele quem dará o ritmo da atividade.

Considerou-se uma jornada diária de 8 horas. Nas tarefas que possuem somente o ajudante na composição da equipe foi considerada a sua produtividade para o cálculo, como é o caso da Limpeza grossa geral, Limpeza fina geral e Numeração das casas. A duração de cada tarefa (duração com a equipe básica), em dias, foi obtida multiplicando-se a produtividade da equipe pela quantidade total de serviço do lote, dividindo este resultado pela duração da jornada diária. Os resultados obtidos foram arredondados para o número inteiro mais próximo, utilizando a fórmula *ARRED* do *software Excel*. Já os recursos básicos foram calculados dividindo-se a produtividade do operário ou ajudante pela produtividade da equipe.

Determinada a duração de cada atividade para uma equipe básica, foi calculada a quantidade de recursos necessários para a execução do serviço. Para isso, foi adotada inicialmente uma estimativa de duração das atividades, baseada em projetos anteriores da empresa em estudo. A quantidade de equipes para cada tarefa foi obtida dividindo-se a duração calculada para a equipe básica pela duração adotada. Determinada a quantidade de equipes, foi calculada a quantidade de recursos necessários multiplicando-se os recursos básicos pela quantidade de equipes de cada tarefa.

**Cronograma e histograma.** Com as atividades e suas durações definidas, foram desenvolvidas as Linhas de Balanço por meio do *software Agilean Planner Freemium*. O prazo final para esta obra, que a construtora esperava ser de 14 meses, seria dia 28 de abril de 2023. Na Figura 3, observa-se que o fim da última atividade no cronograma é dia 15 de setembro de 2023, sendo assim, o tempo total, calculado por meio das durações adotadas, excedeu o prazo estimado para obra. Portanto, será necessária uma análise das durações e o balanceamento das equipes, a fim de promover a compressão do cronograma.

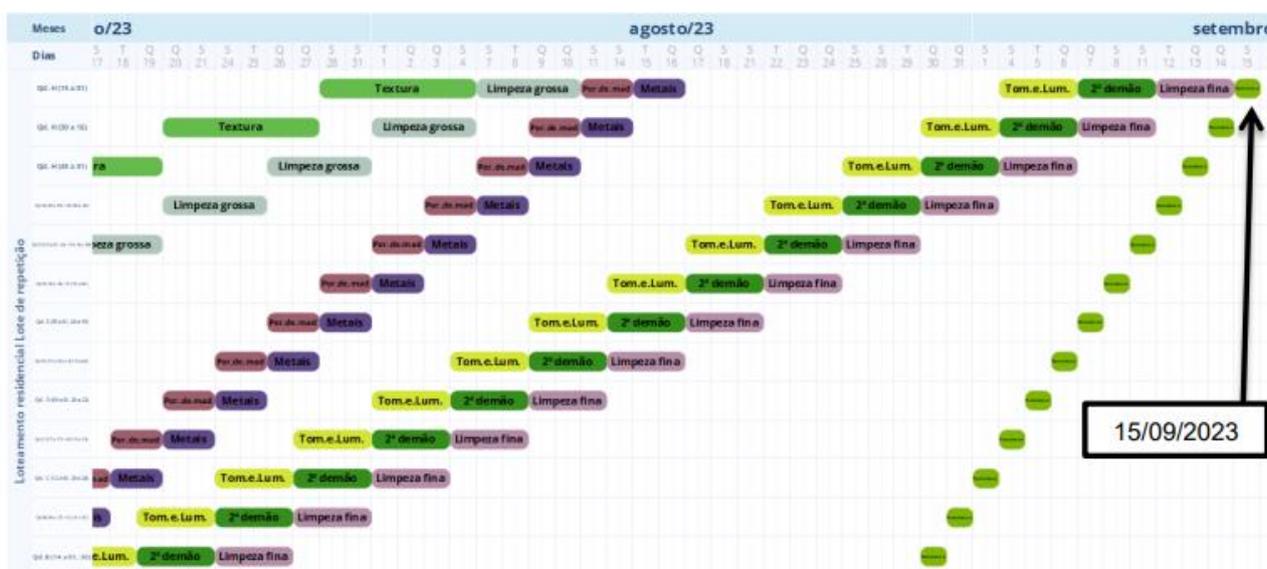


Figura 3: Trecho final do cronograma em linha de balanço

Fonte: Os autores.

Pela análise do cronograma é possível identificar quando uma atividade inicia e termina e, portanto, determinar qual o fluxo dos recursos durante todo o período da obra. Sendo assim, foi construído um histograma com a quantidade de recursos alocados mensalmente (Figura 4).

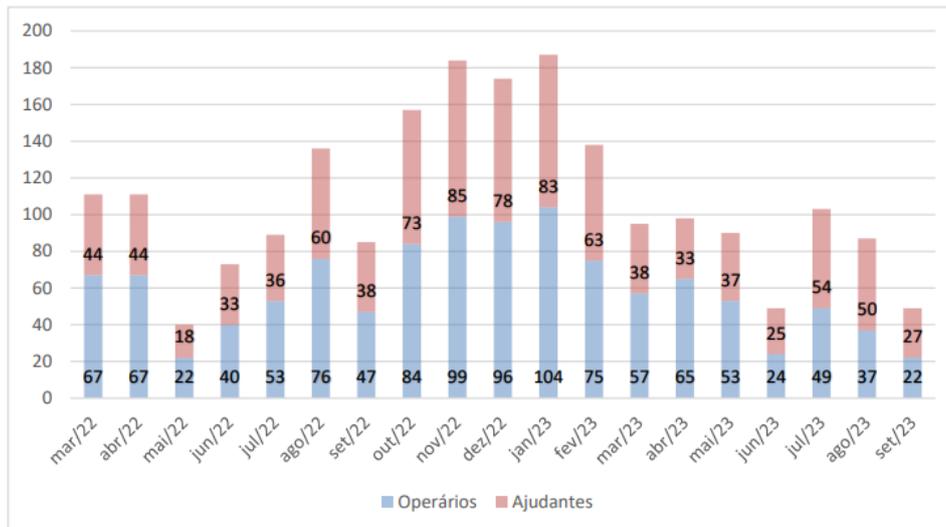


Figura 4: Histograma de recursos sem balanceamento

Fonte: Os autores.

Nesta figura, a obra atinge o pico de funcionários em janeiro de 2023, com um total de 187 pessoas, com seu ponto mais baixo em maio de 2022, com 40 pessoas. Também se nota haver uma grande variabilidade do efetivo no decorrer dos meses, principalmente devido à falta de uniformidade do ritmo das atividades.

**Balanceamento das atividades.** Em decorrência do não atendimento ao prazo estimado pela construtora, o balanceamento dos ritmos de produção faz-se necessário. Assim, foram considerados 4 cenários distintos para a análise do cronograma e da quantidade de funcionários da obra.

#### Cenário 1

Quando há a necessidade de redução de prazo de um cronograma, a medida mais comum é a alocação de mais equipes, reduzindo assim a duração de execução das atividades. Por isso, neste cenário, se considerou que a empresa tem disponibilidade de recursos financeiros para o aumento de efetivo de algumas atividades tidas como críticas ao cronograma, ou seja, aquelas que possuem maior duração. Neste cenário, sete tarefas foram consideradas críticas e tiveram suas durações alteradas.

Aplicando as novas durações ao cronograma, tem-se que a última tarefa do cronograma termina no dia 26 de abril de 2023, ou seja, houve a diminuição de cerca de 5 meses do cronograma inicial, atendendo assim o prazo pretendido de 14 meses pela construtora.

Somando a quantidade de operários e ajudantes de todas as atividades da obra, tem-se o total de funcionários que serão contratados. No caso da situação inicial, a soma dos operários e ajudantes é de 540 pessoas. Para o Cenário 1, esse total passa a ser de 586 funcionários; um aumento de 8,52%.

Adotando que o aumento de custo é diretamente proporcional ao acréscimo de funcionários, pode-se dizer que, para o reforço de efetivo no Cenário 1, é necessário um aumento de custo de mão de obra de 8,52%. Assim, para atender o prazo estipulado pela empresa, é necessário aumentar os custos da obra.

Além disso, com o novo cronograma em Linha de Balanço e quantidades de recursos disponíveis, o pico de trabalhadores passa a ser no mês de setembro de 2022, com 242 pessoas, e o ponto mais baixo no último mês de obra (abril de 2022), com 49 funcionários. Neste cenário, apesar de a variabilidade do efetivo no decorrer dos meses ser menor que a situação original, ela ainda existe.

O dimensionamento das instalações provisórias de um canteiro de obras é feito em função do pico do número de funcionários. Do panorama original para este cenário, houve um aumento de 29,41% neste número. Assim, o canteiro de obras no Cenário 1 precisaria ser proporcionalmente maior, ou seja, resultaria em um aumento no custo das instalações provisórias.

Entretanto, apesar do aumento de custos da mão de obra e das instalações provisórias, houve a redução do prazo de obra, o que impacta diretamente nas despesas indiretas, como manutenção do canteiro e folha de pagamento da engenharia. Desta forma, 5 meses a menos corresponde a uma redução de 26,32% do prazo de obra; assim, pode-se induzir que houve um abatimento de 26,32% dos custos indiretos.

### Cenário 2

Partindo do princípio de que a quantidade de equipes da obra já está no limite do orçamento planejado, a análise das atividades que precisam ser balanceadas foi realizada considerando somente a redução de recursos alocados.

Analisando o cronograma, percebe-se que as tarefas que podem ter seus recursos reduzidos e, ainda assim, proporcionar uma compressão do cronograma são as atividades de durações menores que sua respectiva predecessora. Estes pacotes de trabalho formam uma espécie de gargalo no planejamento, pois, devido à rápida duração e ao fluxo ininterrupto de trabalho, precisam iniciar mais tarde, postergando também o início da próxima atividade.

Na Figura 5, a tarefa “Laje – Concretagem” (em azul escuro) inicia-se no dia 10 de agosto e representa uma atividade gargalo no planejamento. Pelo fato da sua duração ser menor que a da predecessora (Armação – Laje), há uma “espera” para que a tarefa seja iniciada e o fluxo ininterrupto mantido.

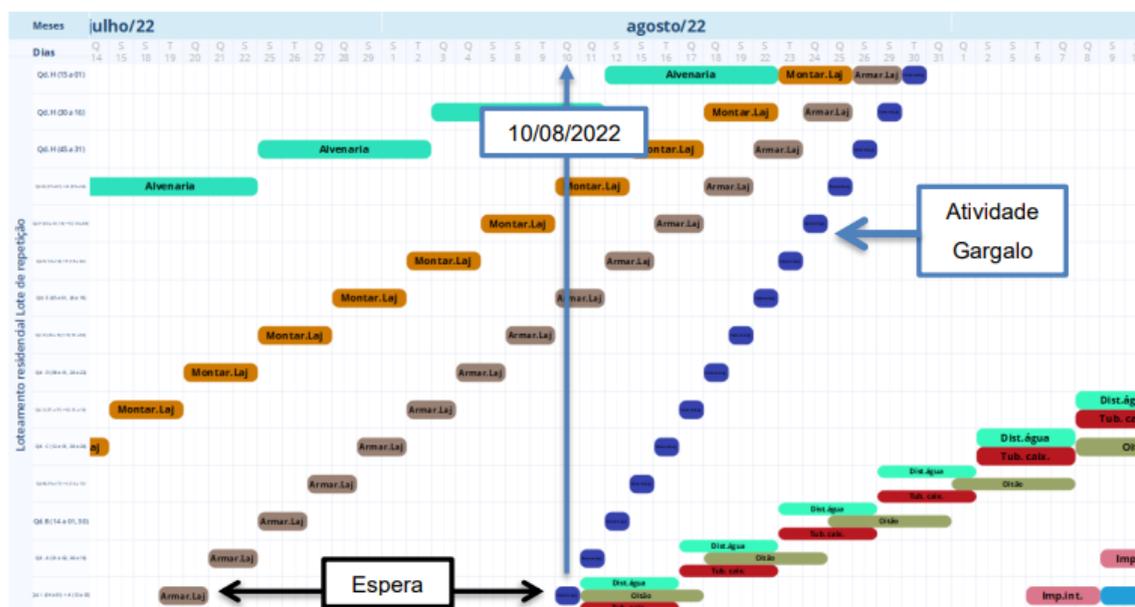


Figura 5: Atividade gargalo no cronograma

Fonte: Os autores.

Reduzindo a equipe da atividade “Laje – Concretagem”, tem-se que a duração da atividade ficará maior. Na Figura 6, foi aplicado o aumento da duração desta atividade. Conseqüentemente, seu início passou a ser no dia 21 de julho, ou seja, a espera para o seu início foi reduzida. Com esta redução da espera, a atividade sucessora como, por exemplo, o “Oitão”, pode ser iniciada antecipadamente, conforme mostra a Figura 6.

Esta análise das atividades gargalo foi replicada para todo cronograma e foram propostas novas durações para 12 atividades, considerando o aumento da duração e, conseqüentemente, a redução dos recursos.

Aplicando as novas durações ao cronograma, tem-se uma redução de cerca de 6 meses em relação ao prazo final calculado na situação inicial. Com isso, a obra terminará no mês de março de 2023, ou seja, 1 mês antes do prazo previsto de 14 meses pela construtora. Novamente, devido à redução de prazo, tem-se uma redução dos custos indiretos da obra. Comparando com a situação inicial, a redução de 6 meses de prazo representa um percentual de 32,58%.

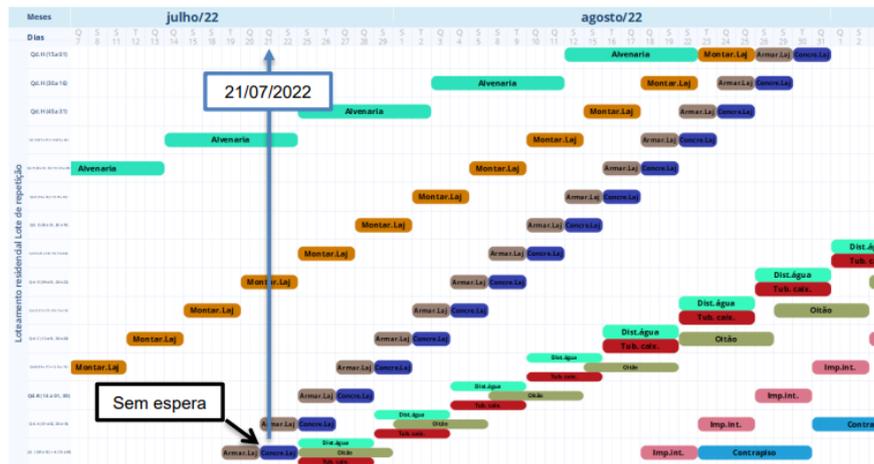


Figura 6: Atividade gargalo após balanceamento

Fonte: Os autores.

Com a redução de recursos, a quantidade de funcionários contratados neste cenário é de 493 pessoas, ou seja, uma redução de 8,7% comparado ao cenário inicial. Além disso, o pico da quantidade de funcionários ocorre em agosto de 2022, com um total de 296 trabalhadores, e o menor número de funcionários é atingido no último mês de obra (março de 2023). Em comparação à situação sem balanceamento, o pico de funcionários aumentou de 187 para 296 funcionários, ou seja, isto representa um aumento de 58,29% nos custos de instalações provisórias.

Cenário 3

Neste cenário, a construtora dispõe de recursos para investir na otimização das equipes. Ela também busca o perfeito balanceamento das atividades, a fim de reduzir ao máximo a ociosidade entre as equipes e assim atingir um cronograma mais comprimido.

Para o balanceamento perfeito das atividades, todas precisam possuir a mesma duração. Para o Cenário 3, foi adotado a duração de 5 dias úteis para todas as atividades da obra. Aplicando essa duração padrão, todas as folgas (ociosidades) entre as atividades foram eliminadas, conforme mostra a Figura 7.

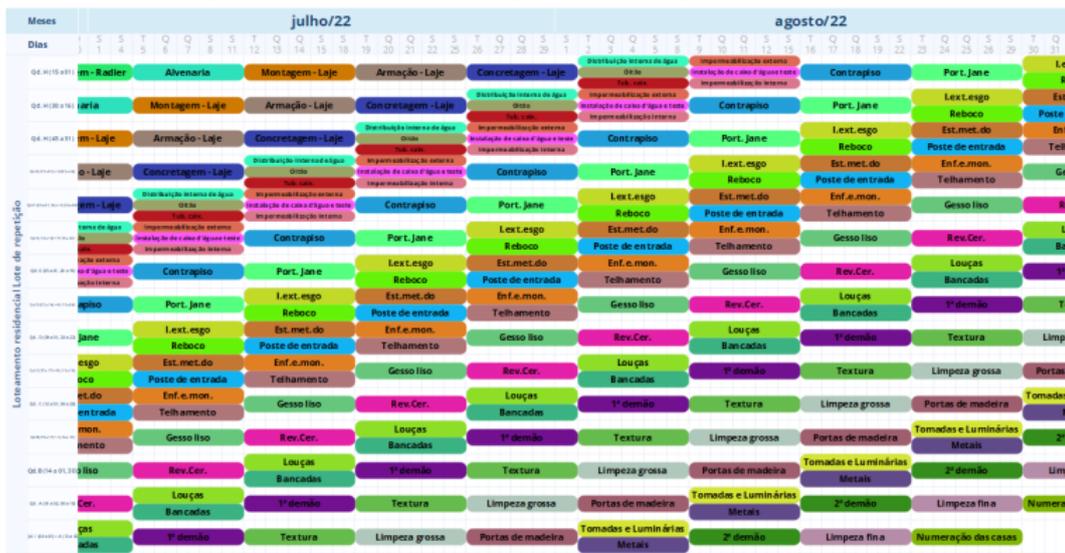


Figura 7: Trecho do cronograma sem folga entre as atividades

Fonte: Os autores.

Analisando o cronograma, a obra terminará no início de dezembro de 2022. Em comparação ao cenário sem balanceamento, houve uma redução de prazo de 9 meses, ou seja, uma redução de 47,37% do tempo de obra e, conseqüentemente, dos custos indiretos.

Neste cenário, o pico de funcionários ocorre em julho de 2022, com um total de 403 trabalhadores, e o menor número de funcionários é atingido no último mês de obra (dezembro de 2022). Para este caso, devido à extrema compressão do cronograma, o aumento do pico de funcionários foi de 115,51% em relação à situação sem balanceamento. Já com relação à quantidade de funcionários do Cenário 3, o total de contratados será de 457 pessoas, ou seja, uma redução de 15,37%, se comparado ao cronograma sem balanceamento.

Apesar desta disposição do cronograma proporcionar a máxima compressão do prazo, esta configuração pode não ser exequível em uma situação real. Devido à inexistência de folgas entre as atividades, qualquer atraso em uma delas impactaria diretamente em todas as outras, culminando com a alteração do prazo final da obra.

#### Cenário 4

Partindo do problema da inexistência de folgas para acomodar as incertezas de uma obra no cenário anterior, para o Cenário 4 faz-se necessário a aplicação de *buffers* no cronograma. Assim, neste cenário foi utilizada a mesma duração padrão de 5 dias úteis, porém foram adotados *buffers* de tempo de 4 dias úteis entre todas as atividades do cronograma. A Figura 8 mostra um trecho dele, em que são observadas as atividades balanceadas e os *buffers* entre elas.

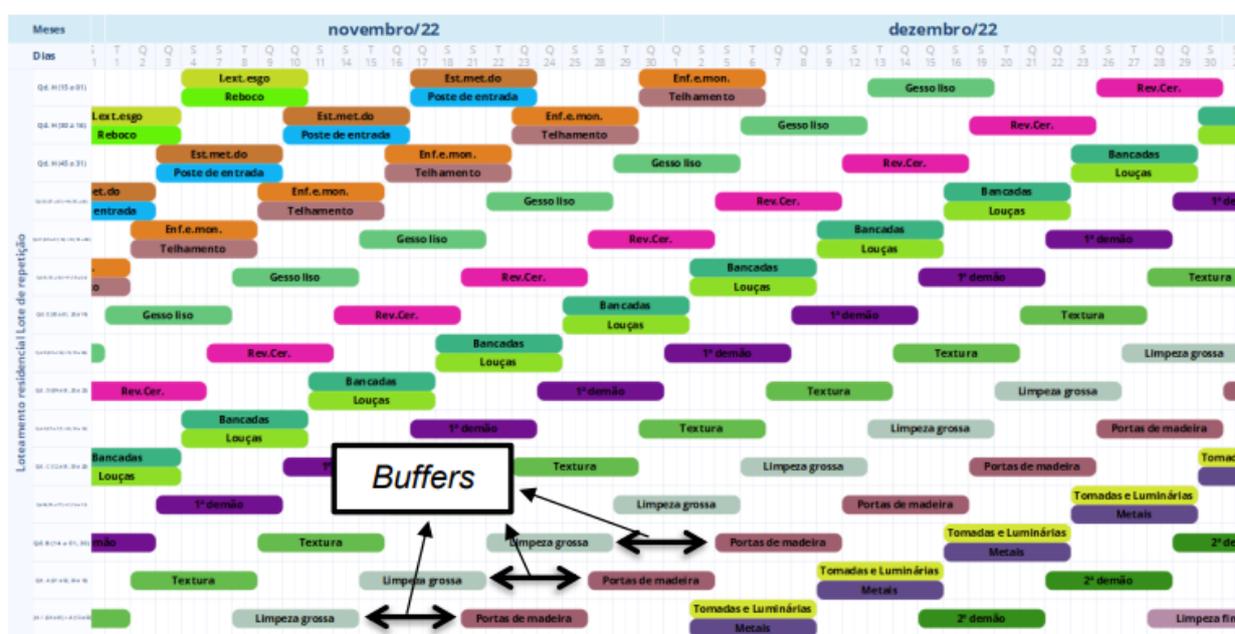


Figura 8: Trecho do cronograma com *buffers* aplicados

Fonte: Os autores.

Com esta premissa aplicada ao cronograma, a data de término da obra passou a ser dia 24 de abril de 2023, atendendo, ao prazo esperado pela empresa. Portanto, houve uma redução do cronograma em 5 meses, ou seja, uma redução de 26,32%, se comparado ao cenário inicial de 19 meses.

Neste cenário, o pico de funcionários ocorre em agosto de 2022, com um total de 298 trabalhadores, e o menor número de funcionários é atingido no último mês de obra, com apenas 9 pessoas (abril de 2023). O aumento do pico de funcionários foi de 59,36% em relação à situação sem balanceamento.

Já com relação à quantidade total de funcionários do Cenário 4, como não houve alteração dos ritmos de produção em relação ao Cenário 3, tem-se o mesmo número de 457 pessoas, ou seja, apresenta a mesma redução de 15,37%, se comparado ao cronograma sem balanceamento.

**Análise dos cenários.** Na Tabela 1, foram reunidos todos os resultados obtidos nas simulações de cenários. As porcentagens de variação foram calculadas em relação ao cenário inicial.

Tabela 1: Comparação entre cenários

Cenários	Data de término	Prazo total		Total de funcionários		Pico de funcionários	
		Meses	Varição (%)	Pessoas	Varição (%)	Pessoas	Varição (%)
Inicial	15/08/2023	19	-	540	-	187	-
Cenário 1	26/04/2023	14	-26,32	586	8,52	242	29,41
Cenário 2	23/03/2023	13	-31,58	493	-8,70	296	58,29
Cenário 3	03/12/2022	10	-47,37	457	-15,37	403	115,51
Cenário 4	24/04/2023	14	-26,32	457	-15,37	298	59,36

Os custos indiretos da obra, como despesas administrativas e contas de consumo, são diretamente proporcionais ao prazo total da obra. Estes custos, apesar de necessários, não agregam valor ao produto entregue ao cliente, por isso, a redução de prazo é um objetivo bastante desejado pela construtora. Analisando os dados da Tabela 1, nota-se que a técnica do balanceamento do ritmo das atividades é bastante eficaz, já que gerou reduções significativas do cronograma em todos os cenários, destacando-se o Cenário 3, que obteve uma redução de quase metade do prazo em relação ao cronograma inicial (-47,37%). Com estes resultados, todos os cenários conseguiram atender à diretriz de prazo da construtora, que era de no máximo 14 meses, e obtiveram reduções consideráveis de custos indiretos em comparação ao cenário inicial.

Em relação ao total de funcionários, com exceção do Cenário 1 que passou por um aumento de equipes (8,52%), todos os outros cenários apresentaram redução no efetivo da obra. O custo de mão de obra, que será contratado em um empreendimento, está diretamente relacionado à quantidade de funcionários. Deste modo, o rearranjo do cronograma resultou em uma redução de até 15,37% da contratação do efetivo e conseqüentemente dos custos atrelados a ela.

A mesma análise pode ser feita relacionada ao pico de funcionários da obra, já que, com este número, pode-se dimensionar o tamanho das instalações provisórias, sendo este outro custo necessário, mas que não agrega valor ao produto. Nas simulações é possível observar que quanto mais comprimido for o cronograma, ou seja, quanto menor o prazo total de obra, maior será o pico de funcionários. Isso se dá devido à maior concentração de atividades em um período, decorrente principalmente do melhor balanceamento das atividades. Desta maneira, a compressão do cronograma provocou um aumento de até 115,51% dos custos de instalações provisórias nos cenários simulados.

Com base nestas suposições, percebe-se que, enquanto algumas despesas são reduzidas, outras são dilatadas. Assim, seria necessário quantificar estes custos de mão de obra, indiretos e de instalações provisórias para cada cenário simulado, a fim de determinar qual situação apresenta uma composição de custos economicamente mais viável. Visto que não foram levantados tais custos neste trabalho, para determinar o melhor cenário, pode-se considerar qual deles possui a menor quantidade de perdas (espaços vazios no cronograma em que não são desenvolvidas atividades). Logo, o Cenário 3 seria o mais indicado, já que não apresenta perdas entre as atividades.

Além disso, com todas as atividades no mesmo ritmo, há um aumento da previsibilidade e controle do fluxo de pessoas e materiais no canteiro de obras. Entretanto, como já apresentado anteriormente, um cronograma sem folgas como o do Cenário 3, torna-se extremamente difícil de ser executado. Portanto, o Cenário 4 seria o mais indicado para ser adotado. Isso porque, as perdas apresentadas são propositalmente calculadas e inseridas para absorver as incertezas da obra (*buffers*), trazendo maior confiabilidade para o cumprimento do cronograma, além de preservar também os benefícios obtidos pela adoção de todas as atividades em um mesmo ritmo.

## Conclusão

O planejamento é essencial para o aumento da eficiência das obras e proporciona ganhos significativos por meio da otimização de recursos e redução de desperdícios, resultando na ampliação das vantagens competitivas da empresa perante o mercado.

A partir do estudo de caso, notou-se que, por meio da utilização da Linha de Balanço, é possível identificar com facilidade o fluxo das atividades e como elas se relacionam em cada lote de repetição, possibilitando maior transparência e assertividade na tomada de decisões. Além disso, a

visualização em linhas permitiu o rápido reconhecimento das atividades que trazem períodos de ociosidade ao cronograma, possibilitando uma tomada de ação mais ágil em sua otimização.

Nos cenários simulados, percebeu-se que o balanceamento das linhas resultou em ganhos significativos de prazo, alcançando reduções de até 47% do tempo de obra, em comparação ao cenário inicial. Porém, cronogramas sem medidas protetivas contra incertezas, acabam sendo de difícil execução. Além disso, o balanceamento também gerou impactos na quantidade de mão de obra contratada, com reduções de até 15% do efetivo total. Notou-se também que, com a compressão do cronograma, mais atividades são realizadas em menor tempo, resultando em um aumento no pico de funcionários da obra, chegando a até 115% de crescimento.

Entretanto, ficou claro que todos esses impactos precisam ser quantificados com o levantamento dos custos atrelados a eles, a fim de determinar qual o cenário economicamente mais viável. Assim, conclui-se que o objetivo do trabalho foi alcançado ao apresentar a montagem e a simulação de vários cenários de um cronograma de obra utilizando o método da Linha de Balanço, possibilitando apontar suas vantagens e ampliar a divulgação desta técnica de planejamento. Por fim, sugere-se que, para trabalhos futuros, sejam levantados os custos dos recursos de mão de obra e despesas indiretas do projeto, para calcular a viabilidade econômica de cada cenário.

## Referências

- [1] CBIC - Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Taxa de crescimento: setores e construção civil. 2020. Disponível em: <http://www.cbicdados.com.br/home/>, em: 26/07/ 2022.
- [2] Mattos, A. D., *Planejamento e Controle de Obras*. 1 ed. Editora Pini, São Paulo, SP, Brasil (2010).
- [3] Slobodzian, J., *Planejamento baseado em locais em obras não repetitivas com foco na criticidade*. Dissertação (Mestrado) – Unicamp, Campinas – SP (2021).
- [4] Kenley, R.; Seppanen, O., *Location-based management for construction: Planning, scheduling and control*. 1. ed. Abingdon: Spon Press (2010).
- [5] Ichihara, J. A., *A base filosófica da Linha de Balanço*. Monografia programa de pós-graduação em engenharia de produção. Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil (1997).
- [6] Prado, R. L., *Aplicação e acompanhamento da programação de obras de múltiplos pavimentos utilizando a técnica da Linha de Balanço*. Dissertação (Mestrado). Florianópolis (2002).
- [7] Vargas, B. H., *Aplicabilidade do método da linha de balanço em obras industriais: estudo de caso para a obra industrial*. Monografia (Graduação em Engenharia Civil) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS (2009).
- [8] Olivieri, H.; Granja, A. D.; Picchi, F. A., *Planejamento tradicional, Location Based Management System e Last Planner System: um modelo integrado*. Ambiente Construído, v. 16, n. 1, (2016) 265–283.
- [9] Laufer, A.; Tucker, R. L., *Competence and timing dilemma in construction planning*. Construction Management and Economics, n. 6, (1988) 339–355.
- [10] Hopp, M. J.; Spearman, M. L., *Factory Physics*. 3. ed. Boston, USA: McGraw-Hill International Editions (2008).
- [11] Mendes Jr., R., *Programação da produção na construção de edifícios de múltiplos pavimentos*. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, 1999.
- [12] Assumpção, J. F. P., *Programação de obras – uma abordagem sobre técnicas de programação e uso de softwares*. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Arquitetura e Planejamento (1998).

- [13]Ballard, H. G., *The Last Planner System of Production Control*. Birmingham: School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Birmingham (2000).
- [14]Ballard, G., *Lookahead Planning: the missing link in production control*. Anais... In: 5th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Gold Coast, Australia (1997).
- [15]Ballard, G.; Howell, G. A., *An update on Last Planner*. Anais... In: 11th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Virginia, USA (2003).
- [16] Mendes Jr. R., Heineck, L. F. M., *Dados básicos para programação de edifícios com linha de balanço - Estudo de caso*. In: VII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. Anais, p. 687 - 695, Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina (1998).
- [17]Formoso, C. T. *et al.*, *Termo de referência para o processo de planejamento e controle da produção em empresas construtoras*. 1. ed. Porto Alegre: NORIE/UFRGS (1999).
- [18]Alves, T. da C. L.; Tommelein, I. D., *Simulation of Buffering and Batching Practices in the Interface Detailing-Fabrication-Installation of HVAC Ductwork*. Anais... in: 12th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Helsingør, Denmark (2004).
- [19]Bertelsen, S.; Koskela, L., *Approaches to Managing Complexity in Project Production*. Anais... in: 13th Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Sydney, Australia (2005).
- [20] Seppänen, O., *A Comparison of Takt Time and LBMS Planning Methods*. Anais... In: 22nd Annual Conference of the International Group for Lean Construction. Oslo, Norway (2014).
- [21]Lumsden, P., *The line-of-balance method*. 1. ed. London: Pergamon Press Limited (1968).
- [22]Büchmann-Slorup, R.; Andersson, N.; Fuhr Pedersen, L., *Criticality in Location-Based Management of Construction*. Tese de Doutorado - Department of Management Engineering, Technical University of Denmark, Dinamarca (2012).
- [23]Ichihara, J. A., *Um método de solução heurística para a programação de edifícios dotados de múltiplos pavimentos-tipo*. Tese de doutorado em Engenharia de produção. Universidade de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil (1998).
- [24]Alves, M. C.; Coelho R. De Q.; Limeira U. R., *Simulação da linha de balanço em edifício alto através do programa Time Line utilizando dados de campo - Estudo de caso*. Trabalho apresentado no Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 64p., Universidade Federal de Santa Catarina (1996).
- [25]Heineck, L. F., *Dados básicos para a programação de edifícios altos por linha de balanço*. In: Congresso Técnico-Científico de Engenharia Civil. Anais, p. 167-173, Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina (1996).
- [26]Santos, A. R., *Metodologia científica a construção do conhecimento*. 2ed. DP&A, Rio de Janeiro, RJ, Brasil (1999).
- [27]TCPO - Tabelas de composição de preços para orçamento. 2021. Disponível em: <https://tcpoweb.pini.com.br/home/home.aspx>. Acesso em 20 de setembro de 2022.
- [28]SINAPI - Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices. 2021. Disponível em: <https://www.caixa.gov.br/poder-publico/modernizacao-gestao/sinapi/referencias-precos-insumos/Paginas/default.aspx>, em 20/09/2022.

## Grau de maturidade em relação aos princípios da construção enxuta: Estudo de caso

KEPPE Renato Abbt<sup>1,a</sup>, FERREIRA Tamiris Capellaro <sup>1,b</sup>, SERRA Sheyla  
Mara Baptista<sup>1,c</sup> e PALIARI José Carlos<sup>1,d</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Civil - Universidade Federal De São Carlos, Rodovia Washington Luís (SP-310), Km 235 - São Carlos - São Paulo - CEP 13565-905 - Caixa Postal 676, Brasil

<sup>a</sup>renatoabbtkeppe@gmail.com, <sup>b</sup>tamiris.capellaro@outlook.com, <sup>c</sup>sheylabs@ufscar.br,  
<sup>d</sup>jpaliari@ufscar.br

**Palavras-chave:** Construção Enxuta, Maturidade *Lean*, Estudo de Caso.

**Resumo.** O objetivo deste trabalho é analisar o grau de maturidade de uma construtora em relação aos princípios da construção enxuta aplicando a ferramenta *DOLC* (*Degree of Lean Construction*). Por meio de um estudo de caso, foi mensurado o seu grau de engajamento em relação aos conceitos da construção enxuta. O método utilizado para a análise consistiu em entrevistas pautadas pela ferramenta *DOLC*, que se baseia em um questionário estruturado. A compilação dos resultados quanto ao grau de maturidade da empresa considera os onze princípios da construção enxuta preconizados por Koskela em 1992. Por meio de entrevista e aplicação do questionário em equipes de 5 níveis hierárquicos (diretoria, engenharia, operários, fornecedores e projetistas), obteve-se de forma quantitativa o grau de maturidade nos princípios da Construção Enxuta. O resultado foi a classificação B (com 74%), que consiste em consciência e aprendizado enxuto, ou seja, a empresa apresentou um bom nível de aderência aos princípios da construção enxuta. Ao fim do trabalho, indicou-se que a pesquisa auxiliará os gestores da empresa na sequência de tomadas de decisão no que concerne aos fundamentos enxutos.

### Introdução

Koskela [1] propôs uma nova filosofia de gerenciamento da construção civil, chamada construção enxuta. Esta filosofia está alicerçada em 11 princípios básicos, que se destacam da concepção tradicional de produção por ter um sistema que minimiza o desperdício de materiais, tempo e esforço em prol de maximizar a geração de valor, considerando o valor do cliente na gestão dos processos [2].

Porém, como destaca Carvalho [3], é importante que haja uma forma de medir o engajamento em tal filosofia. Para isso foi criada a ferramenta *DOLC* (*Degree of Lean Construction*), que consiste em uma série de entrevistas realizadas em diferentes níveis hierárquicos da empresa, com o objetivo de mensurar o grau de maturidade nos princípios da construção enxuta [3]. Trinta e cinco empresas construtoras brasileiras foram analisadas por esse método, conforme ilustra o trabalho de Carvalho e Scheer [4].

O trabalho se justifica ao passo que a empresa estudada cresce em seu número de obras e há interesse na sua industrialização, com foco em resultado: diminuição de prazos e custos, e melhoria em qualidade. O estudo de caso será útil para os gestores avaliarem o desenvolvimento dos trabalhos, compará-los entre pessoas e grupos diferentes, além de fornecer informações úteis ao planejamento estratégico da corporação, fundamentando a tomada de decisão.

O objetivo da ferramenta *DOLC* é ajudar nas dificuldades encontradas pelos pesquisadores e empresas em estabelecer uma metodologia para a implantação da filosofia da construção enxuta, em suma para os que desejam engajar sua produção [4]. Sendo assim, o objetivo desta pesquisa é analisar o grau de maturidade de uma empresa construtora em relação aos princípios da construção enxuta aplicando a ferramenta *DOLC*.

## Aplicação da ferramenta DOLC

A ferramenta de análise consiste em uma série de questionários desenvolvidos por Carvalho [3] com base nos 11 princípios teorizados por Koskela [1]. A análise contempla 5 categorias na empresa: diretoria, engenharia, operários, fornecedores e projetistas.

Segundo Carvalho (p.49) [3]:

A construtora que aplicar este questionário poderá mapear seus pontos fortes e fracos [...] e estabelecer um plano de melhorias baseados na avaliação fornecida pelas áreas analisadas na busca pelo desenvolvimento de seu negócio e satisfação do cliente.

No Quadro 1 é apresentada a quantidade de perguntas dos questionários. A avaliação quantitativa dos questionários tem valores variando de 1 a 5, segundo a escala Likert [5]; as respostas são “desaprovo fortemente”, “desaprovo”, “indeciso”, “aprovo” e “aprovo fortemente”. O modelo se encaixa em pesquisas de opinião, pois, segundo Dalmoro e Vieira [6], tem um ponto neutro (decorrente das escalas ímpares), tem um nível de confiabilidade adequado e se ajusta aos respondentes com diferentes níveis de habilidade. A escala foi estabelecida considerando as médias aritméticas dos resultados por cada ponto de vista diferente em cada um dos princípios analisados.

Quadro 1: Relação entre a quantidade de perguntas do questionário com os princípios da construção enxuta

Princípios, Koskela (1992)		Diretores	Engenheiros	Operários	Clientes	Fornecedores	Projetistas	Número perguntas /princípio
1	Reduzir a parcela de atividades que não agregam valor	4	4	3	5	4	6	26
2	Melhorar o valor do produto através de sistemática consideração das requisições do cliente	3	3	2	4	3	7	22
3	Reduzir variabilidade	4	4	3	2	4	3	20
4	Reduzir o tempo de ciclo	3	3	4	1	4	4	19
5	Simplificar minimizando o número de passos, partes e ligações	5	3	2	3	4	3	20
6	Melhorar a flexibilidade do produto	3	2	2	3	4	3	17
7	Melhorar a transparência do processo	3	3	4	7	4	2	23
8	Focar o controle no processo global	4	3	2	1	2	2	14
9	Construir a melhoria contínua do processo	4	3	3	4	4	4	22
10	Balancear as melhorias no fluxo com as melhorias das conversões	5	4	2	1	2	1	15
11	Referências de ponta ( <i>benchmark</i> )	1	1	1	1	1	1	6
TOTAL PERGUNTAS		39	33	28	32	36	36	204

Fonte: Carvalho [3].

Os resultados das médias aritméticas (Equação 1) são transpostos para percentuais e, conforme Carvalho [3], classificam a empresa nas escalas presentes no Quadro 2. A classificação é feita para cada grupo (diretoria, engenharia, operários, fornecedores e projetistas) e geral.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$$

(1)

sendo:  $x_1, x_2, \dots, x_n$  = grau de valoração do ponto de vista de cada entrevistado  
 $n$  = número de perguntas realizadas

Fonte: Carvalho [3].

Quadro 2: Classificação da empresa conforme o nível de construção enxuta

Nível	Subnível	Percentual	Característica
A	AAA	95% a 100%	Busca pela perfeição na construção enxuta
	AA	90% a 94%	
	A	85% a 89%	
B	BBB	80% a 84%	Consciência e aprendizado enxuto
	BB	75% a 79%	
	B	70% a 74%	
C	CCC	65% a 69%	Foco em qualidade, mas baixo ou nenhum conhecimento em construção enxuta
	CC	60% a 64%	
	C	55% a 59%	
D	DDD	50% a 54%	Baixo foco em melhorias. Conhecimento nulo sobre construção enxuta
	DD	45% a 49%	
	D	0 a 44%	

Fonte: Carvalho [3].

Diversos estudos de caso utilizando a ferramenta *DOLC* foram realizados no Brasil, os resultados estão reunidos em Carvalho e Scheer [4]. O Quadro 3 os apresenta.

Quadro 3: Classificação das empresas estudadas

Nível	Subnível	Percentual	Resultados construtoras	Classificação <i>DOLC</i>
A	AAA	95% a 100%	0	Excelente nível de construção enxuta
	AA	90% a 94%	0	
	A	85% a 89%	0	
B	BBB	80% a 84%	1	Bom nível de construção enxuta
	BB	75% a 79%	6	
	B	70% a 74%	4	
C	CCC	65% a 69%	9	Baixo nível de construção enxuta
	CC	60% a 64%	3	
	C	55% a 59%	4	
D	DDD	50% a 54%	1	Nenhum uso de construção enxuta
	DD	45% a 49%	2	
	D	0 a 44%	5	

Fonte: Adaptado de Carvalho e Scheer [4].

As empresas construtoras analisadas estão localizadas em todo o território nacional (norte, nordeste, sul e sudeste) e, portanto, apresenta um panorama de representatividade suficiente para tirar conclusões a respeito da situação da construção enxuta no país [4].

## Método

O delineamento da pesquisa é composto pelas etapas apresentadas no fluxograma a seguir (Figura 1).

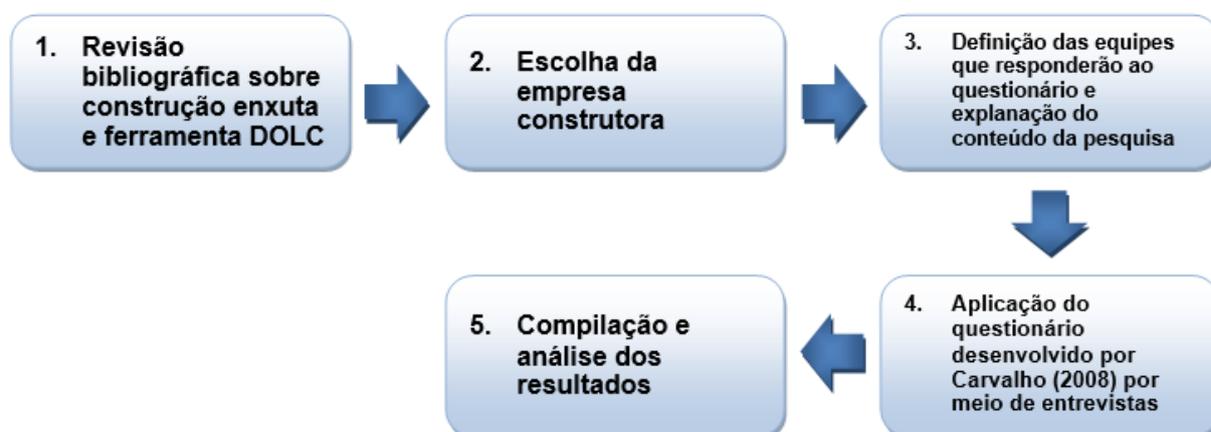


Figura 1: Fluxograma das etapas de trabalho

Fonte: Autores.

**Escolha da empresa construtora.** A empresa construtora em que o estudo foi realizado atua nas áreas de incorporação e construção de empreendimentos imobiliários, desde a fase de coordenação do projeto até a pós-ocupação (manutenção), com foco em habitações populares de Programas do Governo Brasileiro. Há mais de 20 anos no mercado e com mais de 13 mil unidades habitacionais entregues em cidades do interior do Estado de São Paulo, atualmente conta com cerca de 4 mil unidades em construção e com os certificados ISO 9001 e Programa Brasileiro da Qualidade e Produtividade do Habitat (PBQP-H) Nível A.

Caracteriza-se como uma empresa de porte médio. Atualmente conta com cerca de 70 funcionários de engenharia e de administração, sendo metade no escritório centralizado em São Carlos (SP) e a outra metade distribuída pelas obras. Além do quadro de funcionários de engenharia e administração, conta na produção das obras com cerca de 250 funcionários entre mão de obra própria e terceirizada, distribuídos entre as 5 obras.

A construtora oferta 3 tipologias: casas térreas, sobrados geminados e prédios com pavimento térreo mais 3 pavimentos (sem elevador), produtos de padrão popular e financiados por Programas do Governo Federal do Brasil. Quando da realização da pesquisa, a empresa tinha cinco obras em execução, duas em São Carlos (SP) ambas de casas térreas, uma em Piracicaba (SP) de sobrados geminados, uma em Bragança Paulista (SP) de sobrados geminados e uma em Araçatuba (SP) de casas térreas, variando de 400 a 1300 unidades habitacionais. No momento, não havia prédios sendo executados.

Todas as obras englobam a infraestrutura e a edificação, sendo esta última executada com o sistema estrutural de paredes de concreto com formas de alumínio. Pelo fato de o produto ser caracteristicamente sequenciado, a industrialização de obras é um dos valores da empresa.

**Entrevistas.** As entrevistas foram feitas pessoalmente ou por ligação telefônica. Primeiramente, explicou-se a pesquisa e filosofia da Construção Enxuta, para depois colher as respostas sem qualquer tendência ou censura por parte do entrevistador. As entrevistas duraram entre 10 e 20 minutos, a depender da quantidade de comentários e situações exemplo de cada profissional entrevistado.

No Quadro 4, a seguir, apresenta-se a quantidade de entrevistas realizadas considerando as respectivas categorias/funções.

Quadro 4: Quantidade de entrevistas realizadas por categoria/função

<b>Categoria/Funções</b>	<b>Quantidade de entrevistados</b>
Diretores	1
Coordenadores	8
Engenheiros de obras	6
Engenheiros de orçamento	2
Mestres de obras	2
Encarregados	3
Almoxarifes	4
Operários das frentes de serviço (pintor, azulejista, pedreiro, servente, encanador e eletricista)	12
Fornecedores de materiais	4
Empreiteiros	4
Comprador	1
Projetistas	4
Arquitetas	2
<b>Total</b>	<b>53</b>

Fonte: Autores.

## Resultados

A Tabela 1 apresenta a avaliação separada por princípio e por categoria.

Tabela 1: Avaliação do uso dos princípios da Construção Enxuta (geral)

Princípios	Diretoria	Engenharia	Operários	Fornecedores	Projetistas
1	63%	70%	82%	68%	71%
2	66%	38%	80%	48%	84%
3	88%	77%	85%	65%	79%
4	83%	65%	72%	64%	92%
5	39%	77%	75%	78%	83%
6	28%	44%	89%	89%	88%
7	66%	82%	89%	97%	74%
8	76%	77%	70%	72%	88%
9	77%	63%	87%	81%	96%
10	61%	81%	94%	72%	79%
11	64%	38%	74%	97%	92%
Total	65%	65%	82%	75%	84%

Fonte: Autores.

De uma maneira geral, a construtora apresentou 74%, classificação (Tabela 2), nível B, de maturidade em Construção Enxuta (conforme o Quadro 2), logo apresenta consciência e aprendizado enxuto (Quadro 2), um bom nível nos princípios (Quadro 3).

Tabela 2: Grau de maturidade da empresa quanto aos princípios da Construção Enxuta

Princípios (KOSKELA, 1992)	Média (1 a 5)	Percentual enxuto
Reduzir a parcela de atividades que não agregam valor	3,83	71%
Melhorar o valor do produto através de sistemática consideração dos requisitos do cliente	3,53	63%
Reduzir variabilidade	4,15	79%
Reduzir o tempo de ciclo	4,00	75%
Simplificar minimizando o número de passos, partes e ligações	3,81	70%
Melhorar a flexibilidade do produto	3,70	67%
Melhorar a transparência do processo	4,26	82%
Focar o controle no processo global	4,06	76%
Construir a melhoria contínua do processo	4,22	80%
Balancear as melhorias no fluxo com as melhorias das conversões	4,10	78%
Referências de ponta ( <i>benchmark</i> )	3,91	73%
Geral	3,96	74%

Fonte: Autores.

Na Figura 2 apresenta-se graficamente o grau de maturidade geral da empresa quanto aos 11 princípios da Construção Enxuta, em termos percentuais.

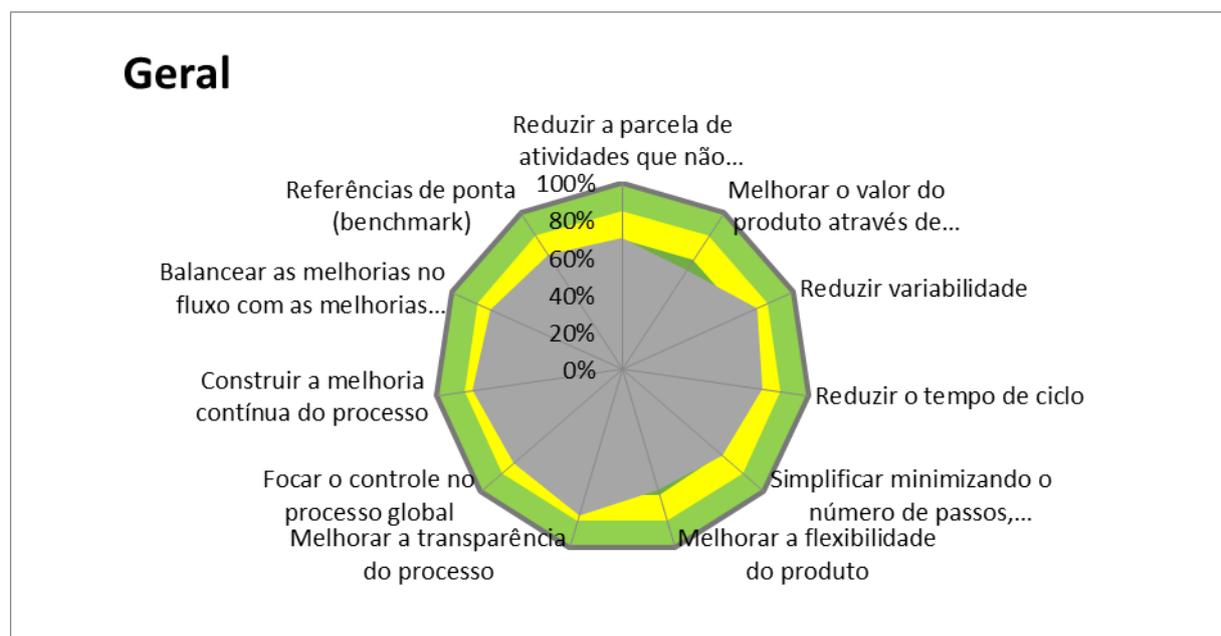


Figura 2: Grau de maturidade da empresa quanto aos princípios da Construção Enxuta

Fonte: Autores.

De acordo com os percentuais apresentados nesta figura, os dois princípios com maior adesão foram “**melhorar a transparência do processo**” e “**construir a melhoria contínua do processo**”, dados que indicam uma empresa agradável de trabalhar, com sistemas de qualidade e de melhoria contínua implantados. Também se destaca como um sucesso no mercado imobiliário de habitações populares.

Já os dois princípios com menor adesão foram “**melhorar o valor do produto através de sistemática consideração dos requisitos do cliente**” e “**melhorar a flexibilidade do produto**”. O segundo até certo ponto se justifica pelo sistema construtivo em paredes de concreto, mesmo que no produto de casas térreas haja a previsão de alteração por parte do proprietário ao se definir em

projeto uma porta para expansão. Como melhoria apenas é indicado a possibilidade de talvez oferecer também alguma flexibilização de *layout* nos sobrados geminados e nos apartamentos.

Como oportunidades de evolução para a empresa, indica-se para a diretoria um estudo da viabilidade em descentralizar os processos, e conscientizar a empresa quanto ao atendimento do cliente interno, pois este quesito teve baixo desempenho, de acordo com as entrevistas.

Para a engenharia, destaca-se a necessidade de aumentar as visitas de clientes às obras, bem como o *benchmark* realizado pelos colaboradores. E em relação aos funcionários das obras, mesmo não apresentando números baixos nas entrevistas, indicam-se alguns pontos de melhoria, tais como divulgação na obra do planejamento como um todo, fornecimento de equipamentos/ferramentas aos funcionários e intercâmbio maior entre as diferentes obras da construtora.

Para os fornecedores, notou-se a necessidade de trabalhar com intuito de capacitar os parceiros, por avaliações e treinamentos. E para os projetistas, destaca-se a necessidade de atualização em relação ao mercado, por exemplo, passando a utilizar ferramentas *Building Information Modeling (BIM)*. Uma das arquitetas entrevistadas da empresa observou: “o processo está em andamento, alguns estudos internos já estão sendo feitos em BIM e para as novas obras os projetos já estão sendo contratados para serem feitos em BIM”.

Por fim, a empresa construtora do estudo de caso apresentou bom resultado frente à média nacional que se tem documentado pelo trabalho de Carvalho e Scheer [4]. Está dentro das 11 melhores das 35 construtoras estudadas (conforme o Quadro 3), e ainda está acima da média em todos os princípios.

## Conclusões

O presente trabalho atingiu o objetivo proposto que consistiu na mensuração do grau de maturidade em Construção Enxuta através de um estudo de caso. A empresa construtora apresentou consciência e aprendizado enxuto, com 74% de maturidade, classificação, nível B.

A principal conclusão diz respeito ao fato de a construtora ser uma empresa agradável de se trabalhar, com sistemas de qualidade e de melhoria contínua implantados e em funcionamento, destacando-se como um sucesso no mercado imobiliário de habitações populares. Os resultados também apontaram haver necessidade de atenção em algumas áreas com oportunidades de melhoria, tais como flexibilidade do *layout* dos produtos, descentralização dos processos internos, conscientização de clientes internos, visita de clientes ao canteiro de obras, *benchmark* por parte da engenharia, alguns requisitos por parte dos operários (principalmente o fornecimento de equipamentos/ferramentas) e a troca de experiências entre as diferentes obras da construtora, capacitação dos fornecedores parceiros e implantação de tecnologia *BIM*.

## Referências

- [1] Koskela, L., *Application of the new production philosophy to construction*. Technical Report. Finland VTT Building Technology. Finland (1992).
- [2] Liker, J. K., *The Toyota way*. Tata McGraw-Hill (2004).
- [3] Carvalho, B. S., *Proposta de uma ferramenta de análise e avaliação das construtoras em relação ao uso da Construção Enxuta*. Universidade Federal do Paraná, Curitiba (2008).
- [4] Carvalho, B. S. and Scheer, S., *Analysis and assessment for Lean Construction adoption: the DOLC tool*. In: LC3 2017 Volume II – Proceedings of the 25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC), Walsh, K., Sacks, R., Brilakis, I. (eds.), Heraklion, Greece, pp. 429-435. DOI: <https://doi.org/10.24928/2017/0117> (2017).
- [5] Likert, R., *A technique for the measurement of attitudes*. Archives of Psychology, 22 140, (1932) 55.

- [6] Dalmoro, M. e Vieira, K. M., *Dilemas na construção de escalas tipo Likert: o número de itens e a disposição influenciam nos resultados?* Edição Especial Epistemologia e Métodos de Pesquisa em Administração e Contabilidade v. 6 n. 3 (2014).

## Dinâmica construtiva na meseta ibérica

PINTO Jorge<sup>1,a</sup>, PAIVA Anabela<sup>1,b</sup>, PEREIRA Sandra<sup>1,c</sup> e BENTO Ricardo<sup>2,d</sup>

<sup>1</sup>UTAD/CMAD, Quinta de Prados 5000-801 Vila Real, Portugal

<sup>2</sup>UTAD/CETRAD, Quinta de Prados 5000-801 Vila Real, Portugal

<sup>a</sup>tiago@utad.pt, <sup>b</sup>apaiva@utad.pt, <sup>c</sup>spereira@utad.pt, <sup>d</sup>rbento@utad.pt

**Palavras-chave:** Meseta Ibérica, Dinâmica Construtiva, Construção Rural, Aldeia, Património, Reabilitação.

**Resumo.** A Meseta Ibérica é uma região localizada ao longo da fronteira do Douro internacional que apresenta uma paisagem rural peculiar e de uma beleza ímpar. A paisagem urbana também marca esta paisagem. Neste contexto, um trabalho de investigação foi desenvolvido no sentido de caracterizar a paisagem urbana à escala da aldeia nesta região e com o objetivo de contribuir para a sua valorização e a sua preservação. Foram selecionadas seis aldeias representativas desta região. Do lado Português, as aldeias de Atenor, de Rio de Onor e de Bemposta foram as escolhidas. Do lado Espanhol, as aldeias de Fariza, de Riomanzanas e de San Martín de Castañeda foram as eleitas. Através do levantamento do estado de conservação dos edifícios destas aldeias é possível perceber a dinâmica construtiva desta região. O objetivo principal deste artigo consiste precisamente em partilhar alguns dos dados recolhidos aquando do trabalho de campo sobre esta temática. Para o efeito e de forma a simplificar, foram consideradas neste artigo as aldeias de Rio de Onor e de San Martín de Castañeda como exemplo. Observou-se que apesar da Meseta Ibérica ser uma região interior, rural e com forte despovoamento, está vincada uma dinâmica construtiva que tende a acompanhar aquela que se verifica em centros mais urbanos, culminando com a tendência mais recente de prevalência da reabilitação.

### Introdução

Um trabalho de investigação [1] focado no estudo da paisagem da Meseta Ibérica foi desenvolvido e no sentido de reunir informação que potencie a preservação e a valorização deste património.

Atendendo a que o espaço urbano também faz parte desta paisagem o seu estudo também foi considerado à escala da aldeia. Para o efeito, foram selecionadas seis aldeias representativas da paisagem urbana desta região. Do lado Português, as aldeias de Atenor, de Rio de Onor e de Bemposta foram as escolhidas. Do lado Espanhol, as aldeias de Fariza, de Riomanzanas e de San Martín de Castañeda foram as eleitas.

Um trabalho de campo de levantamento do património construído nestas aldeias permitiu caracterizar mais de 700 edifícios.

Muitos aspetos técnicos foram tidos em conta na caracterização destes edifícios dos quais se destacam o tipo de edifício, o estado de conservação do edifício, o tipo de utilização, o número de pisos, o tipo de cobertura, o tipo de estrutura, o tipo de parede exterior, o tipo de argamassa de assentamento e de reboco, o tipo de acabamento das paredes exteriores, o tipo de caixilharia dos vãos de porta e de janela, a cor (das fachadas, da cobertura e dos vãos de porta e janela), entre outros.

Observou-se que muitos destes edifícios ainda se encontram no seu estado original de construção [2-3].

Trabalhos similares de levantamento do património construído têm sido feitos noutras regiões [4].

Neste contexto, este artigo tem como principal objetivo perceber a dinâmica construtiva ocorrida na Meseta Ibérica e tendo em conta a sua peculiaridade de ser a maior Reserva da Biosfera transfronteiriça da Europa.

De modo a simplificar a escrita deste artigo foram consideradas as aldeias de Rio de Onor e de San Martín de Castañeda como caso de estudo.

Deste modo, este artigo está estruturado da seguinte forma. Após esta breve introdução, será abordado o estado de conservação dos edifícios das aldeias de caso de estudo. Depois, serão facultados alguns dados dos aspetos construtivos destas aldeias tais como o tipo de material estrutural dos elementos estruturais verticais, o tipo de argamassa de assentamento de alvenaria, o tipo de acabamento da fachada, o tipo de material de revestimento da cobertura e os tipos de materiais das caixilharias dos vãos de janela. Após esta fase, será processa uma reflexão sobre a dinâmica construtiva. Finalmente, serão tecidas as principais conclusões.

Concluiu-se que apesar de esta região ser remota, interior e muito afetada pelo despovoamento e pela emigração dinâmica construtiva tende a acompanhar a ocorrida nos centros urbanos.

### Estado de conservação das aldeias de caso de estudo

Nas Figuras 1 e 2 estão apresentados os mapas do estado de conservação das aldeias de Rio de Onor e San Martín de Castañeda, respetivamente. Com base nos edifícios estudados, observa-se nesses mapas, que em ambas estas duas aldeias existem edifícios antigos, edifícios novos, edifícios reabilitados e edifícios em construção. Como tal, verifica-se que existe uma dinâmica construtiva ao longo do tempo.

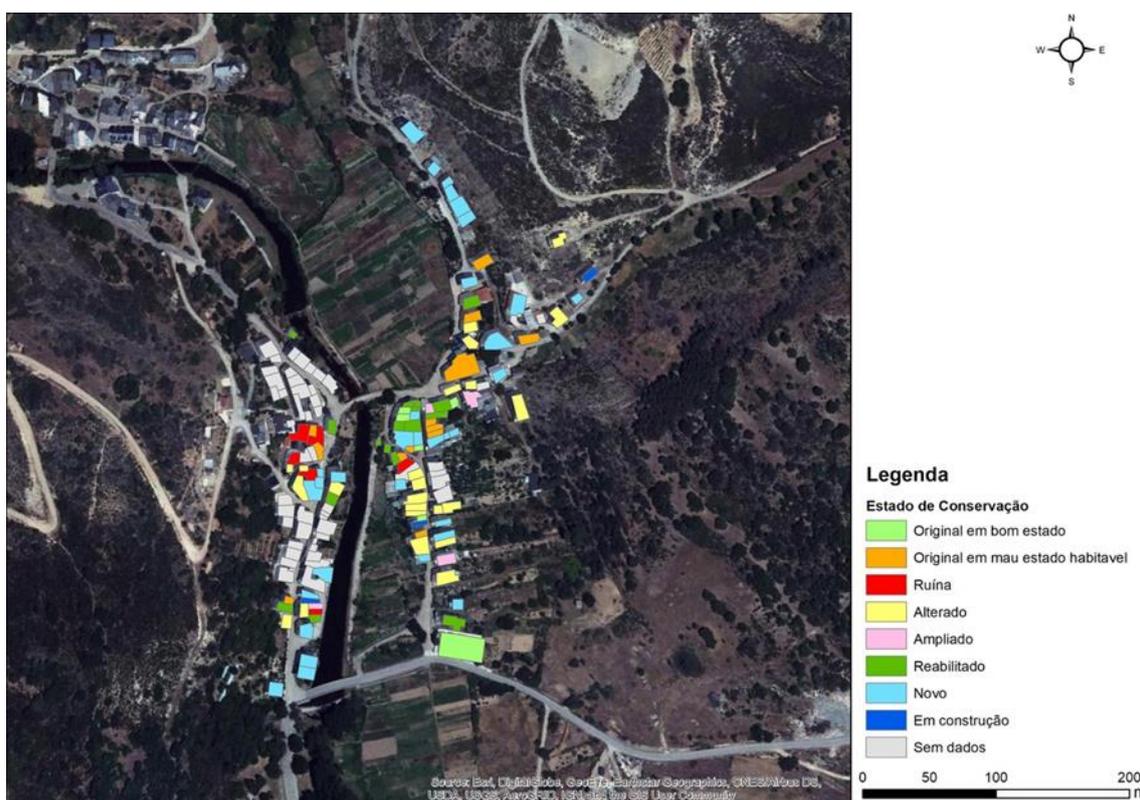


Figura 1: Rio De Onor. Mapa do estado de conservação

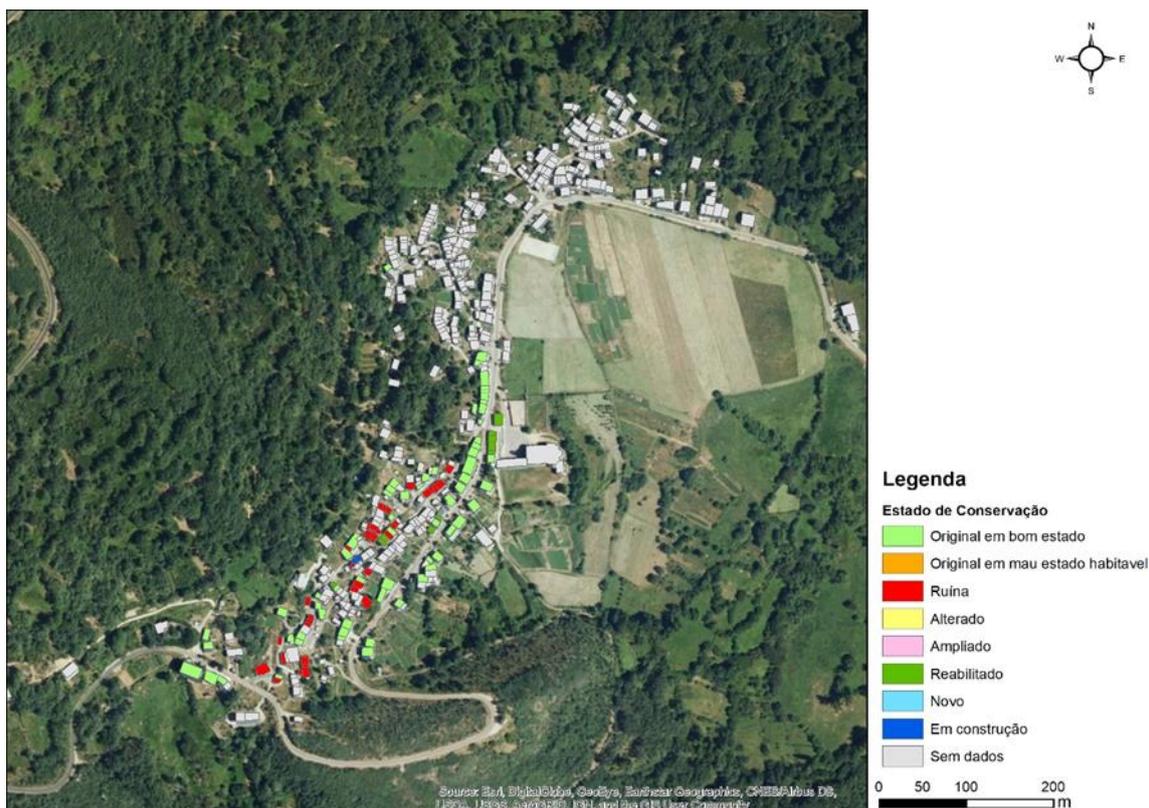


Figura 2: San Martín de Castañeda. Mapa do estado de conservação

### Alguns aspetos construtivos das aldeias de caso de estudo

**Material estrutural dos elementos estruturais verticais.** Nestas duas aldeias, em termos de material dos elementos estruturais verticais (paredes e pilares), verifica-se também que existe uma dinâmica construtiva alinhada com a ocorrida nos centros urbanos. Para além das soluções estruturais mais tradicionais dos tipos de alvenaria de pedra (xisto e granito) e de tabique, também surge a solução de betão armado na construção de edifícios mais recentes. Esta realidade verifica-se de uma forma generalizada na Meseta Ibérica. As aldeias de Rio de Onor e de San Martín de Castañeda são um exemplo deste facto, Figuras 3.

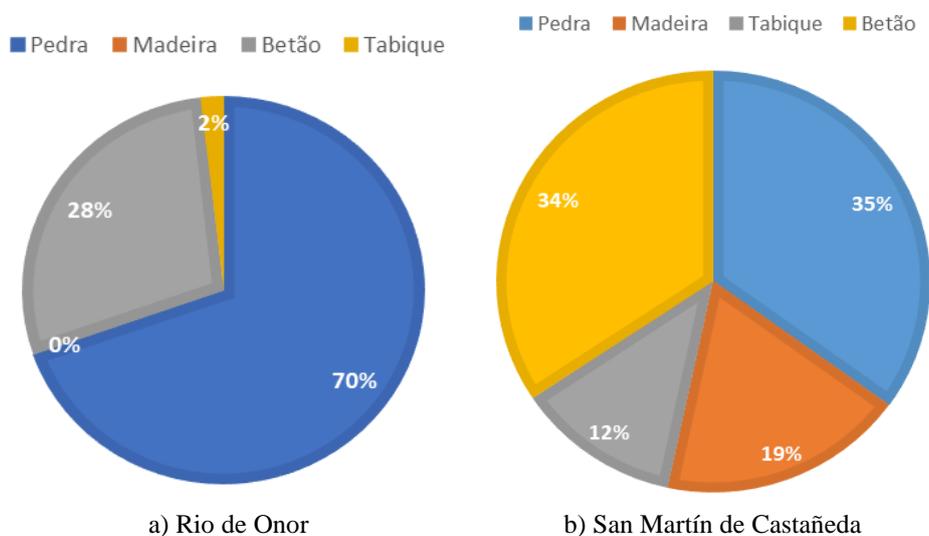


Figura 3: Material estrutural dos elementos estruturais verticais

**Argamassa de assentamento de alvenaria.** No que diz respeito ao tipo de argamassa de assentamento de alvenaria, os dados recolhidos para as aldeias de Rio de Onor e de San Martín de Castañeda estão espelhados nos gráficos das Figuras 4 e 5, respetivamente. Para além das soluções

mais tradicionais de terra e cal, de terra e palha e de junta seca, que se observa mais em edifícios antigos, a solução de argamassa à base cimento tende a ser dominante em ambos os casos. Esta realidade indica que também no domínio das argamassas ocorreu uma evolução alinhada com aquela verificada nos centros urbanos.

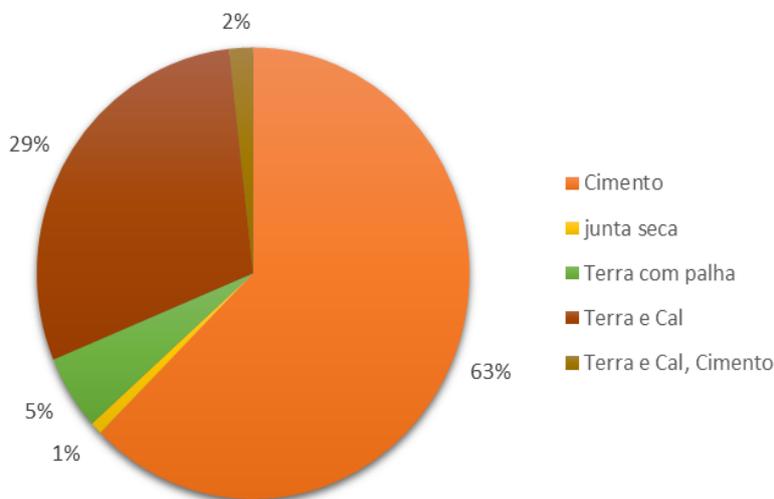


Figura 4: Rio de Onor. Argamassa de assentamento de alvenaria

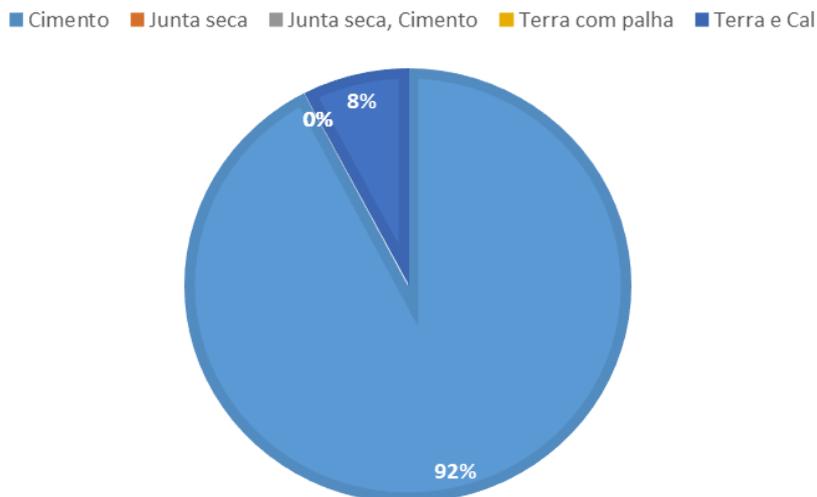


Figura 5: San Martín de Castañeda. Argamassa de assentamento

**Acabamento da fachada.** No que diz respeito ao tipo de acabamento das fachadas, os gráficos das Figuras 6 e 7 contêm informação sobre este aspeto técnico referente às duas aldeias de caso de estudo. Pedra à vista é claramente a solução mais aplicada. Esta realidade é observada na construção antiga, reabilitada e nova. Reboco de argamassa de cimento também tem alguma relevância em ambas as aldeias. No caso da aldeia de San Martín de Castañeda, o acabamento de fachada em monomassa também é uma solução aplicada em construção nova. Face ao apresentado, também o tipo de material aplicado em fachadas é indicador dos sinais do tempo nas dinâmicas construtivas desta região.

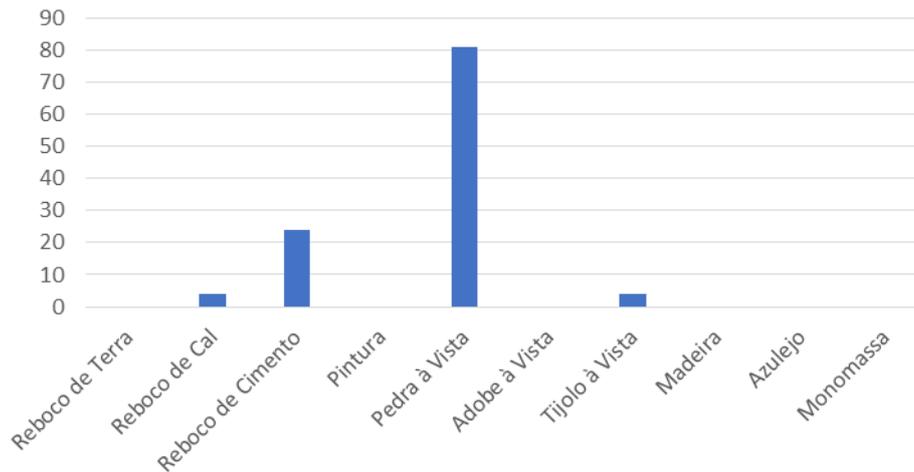


Figura 6: Rio de Onor. Acabamento da fachada

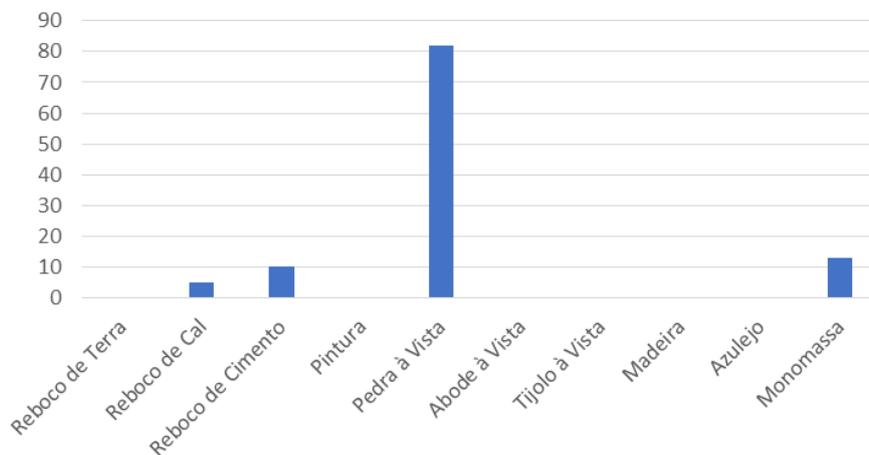


Figura 7: San Martín de Castañeda. Acabamento de fachada

**Material da cobertura.** No que diz respeito ao material de revestimento da cobertura, observa-se que na aldeia de Rio de Onor, a lousa é o material mais aplicado, Figura 8. Por sua vez, na aldeia de San Martín de Castañeda a telha de cimento é a solução de revestimento de cobertura mais vinculada, Figura 9. Contudo, em ambos os casos, existe uma diversidade expressiva de materiais, desde os mais tradicionais (i.e. lousa) aos mais contemporâneos (i.e. chapa metálica sandwich). Esta realidade também demonstra a dinâmica construída que esta região tem sofrido ao longo do tempo.

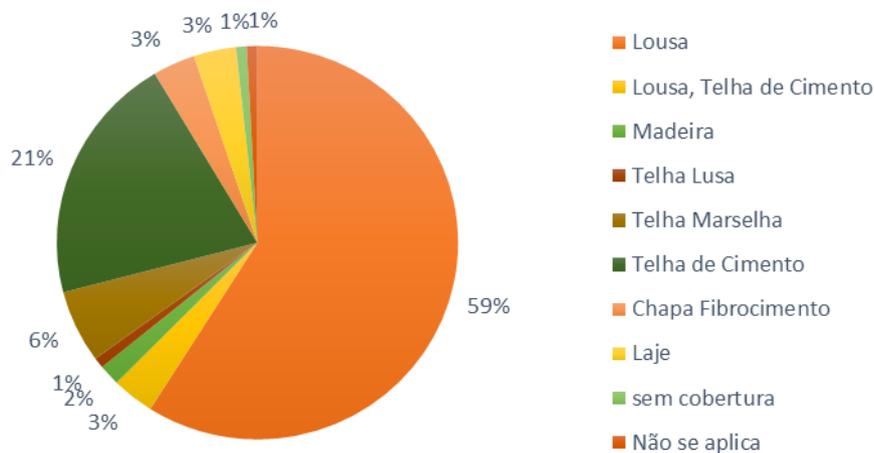


Figura 8: Rio de Onor. Material de revestimento da cobertura

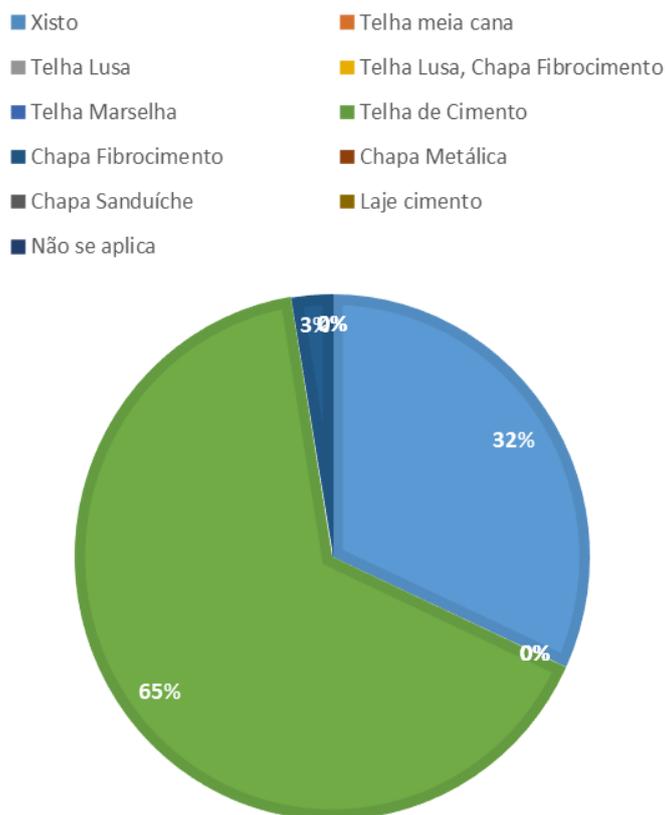


Figura 9: San Martín de Castañeda. Material de revestimento da cobertura

**Material dos vãos de janela.** Em termos dos materiais aplicados nas caixilharias dos vãos de janela também se observa a mesma tendência dinâmica construtiva variando entre a solução mais tradicional (a madeira) e as soluções mais contemporâneas (o alumínio e o PVC). Importa referir que na aldeia de Rio de Onor a solução de madeira é claramente a mais dominante.

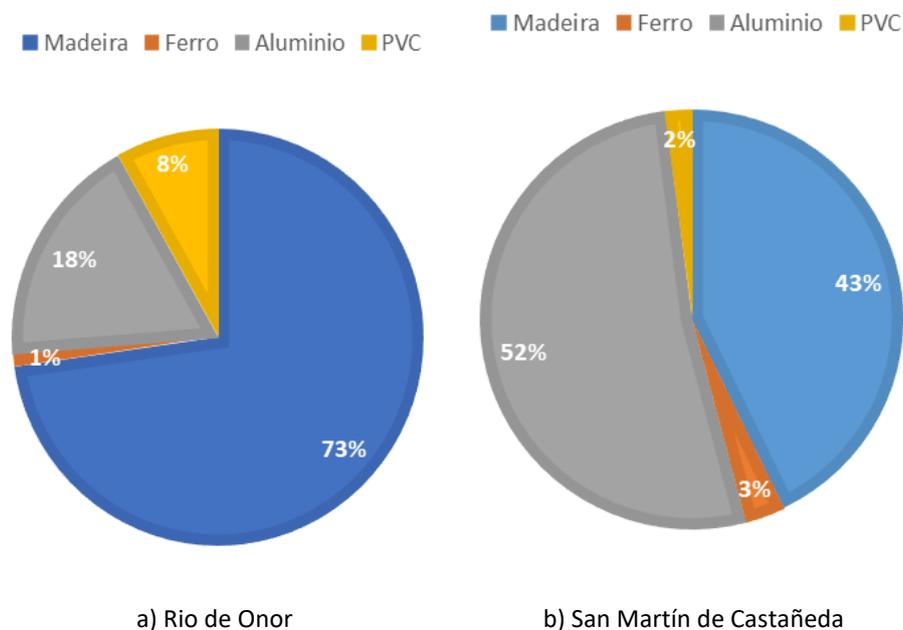


Figura 10: Material das caixilharias dos vãos de janela

**Dinâmica construtiva.** De acordo com o exposto nas Figuras 1 e 2, nas aldeias estudadas, existem edifícios antigos e edifícios novos. Os edifícios antigos tendem a ser em quantidade superior em relação aos edifícios novos, o que acompanha a evolução demográfica. Os edifícios antigos encontram-se em ruína, conservados e rehabilitados, Figura 11. Geralmente, os edifícios

novos foram construídos maioritariamente segundo as técnicas construtivas mais correntemente aplicadas à data, Figura 11.b. A tendência construtiva mais atual está mais centrada na reabilitação, Figura 11.d. Neste último caso, verifica-se que existe um maior cuidado no respeito das técnicas construtivas e dos materiais de construção mais tradicionais, Figura 11.d. Esta realidade é verificada em ambas as partes da Meseta Ibérica, embora nas aldeias Espanholas estudadas se observe um ligeiro avanço, Figura 11.d.



a) Antigo



b) Novo



c) Ampliado



d) Reabilitado

Figura 11: Dinâmica construtiva

## Conclusão

- Apesar da Meseta Ibérica se tratar de um território interior, rural e com baixa densidade populacional, verifica-se que a construção tem evoluído de certa forma alinhada com a verificada nos territórios mais urbanos.
- Esta realidade é observada nas técnicas construtivas e nos materiais de construção aplicados ao longo do tempo.
- Grande parte da construção antiga, do tipo vernacular, mantém-se no estado original e a necessitar de intervenções de reabilitação.
- A reabilitação deste património tem passado a ser uma opção de eleição.

## Agradecimentos

Este trabalho de investigação foi parcialmente financiado pela FCT através do projeto UIDB/04082/2020 (C-MADE) e pelo FEDER através do projeto 0421\_PAISAJE\_IBERICO\_2\_E.

## Referências

- [1] *Red de paisajes rurales en la frontera del Duero: un mapa estratégico de la meseta ibérica*. EP - INTERREG V A España Portugal (POCTEP), 2015-2018.
- [2] Jorge Pinto, Anabela Paiva, Diogo Almeida, Sandra Cunha, Ana Antunes, Ricardo Bento, *Um inventário sobre argamassas em Atenor*. Revista Pedra & Cal – Conservação & Reabilitação. Edição Especial – IV Simpósio de Argamassas e Soluções Térmicas de Revestimento. GECORPA. Ano XXIV, Nº 72 (2022) 10-13. ISSN 1645-4863.M.A. Green: *High Efficiency Silicon Solar Cells* (Trans Tech Publications, Switzerland 1987).
- [3] Jorge Pinto, Anabela Paiva, Diogo Almeida, Sandra Cunha, Ana Antunes, Ricardo Bento, *Highlighting the Heritage of Meseta Ibérica*. HERITAGE 2022 - International Conference on Vernacular Heritage: Culture, People and Sustainability. Editorial Universitat Politècnica de València. September 15th-17th, Valencia, Spain, (2022) 173-180, ISBN: 978-84-1396-020-3, Doi: <https://doi.org/10.4995/HERITAGE2022.2022.14559>.
- [4] A. Cepeda, J. Lousada, J. Vieira, H. Varum, P. Tavares, L. Fernandes, J. Pinto, *Estudo do material terra aplicado na construção de tabique existente no Alto Tâmega*, Terra em Seminário 2010, 6º Seminário Arquitetura de Terra em Portugal e 9º Seminário Ibero-Americano de Arquitetura e Construção com Terra. ARGUMENTUM. Editores: Maria Fernandes, Mariana Correia, Filipe Jorge. 1ª Edição – Fevereiro, 67-1 (2010) 160-162, ISBN: 978-972-8479.