

Universidade do Minho
Escola de Engenharia

Carlos Miguel Rodrigues Angeiras

***Papercrete* – Caracterização Experimental**

junho de 2023



Universidade do Minho

Escola de Engenharia

Carlos Miguel Rodrigues Angeiras

***Papercrete* – Caracterização Experimental**

Dissertação de Mestrado

Mestrado em Engenharia Civil – Edifícios

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Aires Camões

Professora Doutora Rute Eires

DIREITOS DE AUTOR E CONDIÇÕES DE UTILIZAÇÃO DO TRABALHO POR TERCEIRO

Este é um trabalho académico que pode ser utilizado por terceiros desde que respeitadas as regras e boas práticas internacionalmente aceites, no que concerne aos direitos de autor e direitos conexos.

Assim, o presente trabalho pode ser utilizado nos termos previstos na licença abaixo indicada.

Caso o utilizador necessite de permissão para poder fazer um uso do trabalho em condições não previstas no licenciamento indicado, deverá contactar o autor, através do RepositóriUM da Universidade do Minho.

Agradecimentos

A realização desta dissertação só foi possível devido ao contributo de todos aqueles que, de uma forma ou de outra, ajudaram na sua realização. Por isso a todos um sincero obrigado.

Ao professor doutor Aires Camões e a professora doutora Rute Eires, por quem tive o privilégio de ser orientado e que sempre me forneceram uma grande disponibilidade, incentivo e incansável apoio durante a realização desta dissertação que sofreu sempre uns altos e baixos.

Um agradecimento especial ao técnico de laboratório, Carlos Jesus, por todo o auxílio prestado durante a realização do trabalho prático. Desde a preparação de provetes, à realização de ensaios.

Aos meus colegas de curso que sempre me incentivaram e com quem sempre pude contar para trocar impressões e me acompanharam durante estes anos académicos. Obrigado, Alexandre Martins, João Ribeiro, Adriana Lemos, Luísa Sampaio, Raquel Rodrigues, João Coelho, Francisco Rodrigues e Bruno Guimarães.

A todos os Amigos, por o terem sido. O vosso apoio e motivação foram fundamentais para conseguir ultrapassar os momentos decisivos. Obrigado, Inês Pereira, Fernanda Ferro, Carlos Silva, Daniel Oliveira, Luís Fernandes, Filipa Silva, Marcelo Lima, Ana Magalhães, João Machado e Bruno Vilela.

À minha namorada, Sofia Gomes, por todo o carinho, paciência e ajuda incondicional em todos os momentos.

Aos meus pais e avós pelo encorajamento, compreensão e incondicional apoio ao longo destes anos universitários.

DECLARAÇÃO DE INTEGRIDADE

Declaro ter atuado com integridade na elaboração do presente trabalho académico e confirmo que não recorri à prática de plágio nem a qualquer forma de utilização indevida ou falsificação de informações ou resultados em nenhuma das etapas conducente à sua elaboração. Mais declaro que conheço e que respeitei o Código de Conduta Ética da Universidade do Minho.

Título da dissertação : *Papercrete* – caracterização experimental

Resumo

Esta dissertação incide sobre o estudo do *papercrete*, como uma solução sustentável na construção. Assim sendo, o principal objetivo desta dissertação centra-se no uso de papel no fabrico de argamassas mais sustentáveis, de forma a utilizar o desperdício de papel, assim como reduzir a utilização de areia e cimento na construção.

Foi elaborado um material constituído por 2 tipos de papel: papel de impressão e papel *kraft*. Inicialmente, recorreu-se ao estudo do teor de humidade dos 2 tipos de papel de forma a poder analisar qual o melhor tempo de filtração a que estes materiais devem estar sujeitos. Em seguida, após selecionados os 3 tempos de filtração onde ocorrem alterações mais significativas, começou-se o fabrico das primeiras argamassas. Estas argamassas apenas foram concebidas com a utilização de 1 tipo de papel (papel *kraft*), em seguida variou-se os diferentes tempos de filtração, as diferentes percentagens de cimento, a utilização de película aderente na cura do material, assim como o recurso a uma estufa. Após todas as misturas concretizadas de forma a conseguir avaliar qual delas poderia ser utilizada como padrão, estas foram ensaiadas à compressão, onde o material com o melhor comportamento iria ser o utilizado na restante dissertação.

Após definida a mistura padrão, foram produzidas mais argamassas. Nestas, mudou-se o tipo de papel para papel de impressão, utilizou-se o papel *kraft* seco e acrescentou-se diferentes volumes de areia nas misturas com papel de impressão, assim como nas com papel *kraft*.

Posteriormente, estas misturas foram ensaiadas de forma a poder obter as suas propriedades mecânicas (flexão e compressão), de capacidade de absorção de água (imersão e capilaridade) e térmicas. Em seguida, comparou-se os resultados obtidos com materiais utilizados na construção, de forma a conseguir analisar quais poderiam ser as suas aplicações futuras. Também se analisaram os resultados tendo em vista verificar qual a melhor solução

As principais conclusões retiradas deste trabalho experimental foram que o *papercrete* apesar de ser um material muito leve e com baixas resistências mecânicas pode ser utilizado em obra como um material de isolamento ou recobrimento desde que este seja aplicado no interior, pois este material absorve água com muita facilidade. Relativamente aos papéis, ambos podem ser utilizados e a areia apesar de retirar resistência mecânica aos provetes, mostrou-se benéfica no retardamento da absorção de água.

Palavras-chave: *Papercrete*, papel, mistura padrão, papel de impressão, papel *kraft*, sustentabilidade

Thesis Title: *Papercrete experimental characterization*

Abstract

This dissertation focuses on the study of papercrete, as a sustainable solution in construction. Therefore, the main objective of this dissertation focuses on the use of paper in the manufacture of more sustainable mortars, in order to use paper waste, as well as to reduce the use of sand and cement in construction.

A material consisting of 2 types of paper was prepared: printing paper and kraft paper. Initially, the moisture content of the two types of paper was studied in order to analyse the best filtration time to which these materials should be subjected. Then, after selecting the 3 filtration times where more significant changes occur, the production of the first mortars was started. These mortars were designed using only one kind of paper (kraft paper), then the different filtration times, the different cement percentages, the use of adherent film in the curing of the material, as well as the use of an oven. After all the mixtures were finished, in order to evaluate which one could be used as a standard, they were tested to compression, where the material with the best behavior would be the one used in the remaining dissertation.

After defining the standard mixture, more mortars were produced. In these, the type of paper was changed to printing paper, dry kraft paper was used and different volumes of sand were added to the printing paper mixtures, as well as to the kraft paper.

Subsequently, these mixtures were tested in order to obtain their mechanical properties (bending and compression), water absorption capacity (immersion and capillarity) and thermal properties. Then, the results obtained were compared with materials used in construction, to analyze which could be their future applications. It was also analyzed the differences with other experiments performed with the same material, checking which was the best solution.

The main conclusions drawn from this experimental work were that, although papercrete is a very light material with low mechanical strength, it can be used on site as an insulating or covering material, if it is applied indoors, as this material easily absorbs water. In relation to paper, both can be used and sand, despite removing mechanical resistance from the specimens, proved to be beneficial in retarding water absorption.

Keywords: Papercrete, paper, standard mixture, printing paper, kraft paper, sustainability

Índice

1. Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Metodologia.....	3
1.4 Estrutura de Dissertação	5
2. Revisão Bibliográfica	6
2.1 Desperdício de papel	6
2.2 <i>Papercrete</i>	7
2.3. Experiências realizadas com <i>papercrete</i>	7
2.3.1 Resistência à Flexão	7
2.3.2. Resistência à Compressão	9
2.3.3. Absorção de água	10
2.3.4. Condutividade Térmica	11
3. Materiais e procedimentos de ensaio	13
3.1. Materiais	13
3.1.1. Ligante.....	13
3.1.2. Agregados.....	14
3.2. Procedimentos de Ensaio	18
3.2.1 Teor de humidade.....	19
3.2.2. Mistura da argamassa e preparação dos provetes	22
3.2.3. Cura do betão	25
3.2.4. Mesa de espalhamento.....	26
3.2.5. Ensaio de compressão.....	27
3.2.6. Ensaio de absorção de água por capilaridade.....	29
3.2.7. Ensaio de absorção de água por imersão	31
3.2.7. Ensaio de resistência à flexão	32
3.2.8. Ensaio Térmico.....	33
4. Resultados	38
4.1. Teor de Humidade.....	38
4.2. Quantidades dos materiais utilizados nas misturas.....	40
4.3. Compressão	43
4.3. Flexão.....	52

4.4. Ensaio de absorção de água por capilaridade	56
4.5. Ensaio de absorção de água por imersão.....	63
4.5. Ensaio térmico	66
4.6. Análise microscópica	73
5. Conclusões	76
Bibliografia	78

Lista de abreviaturas

PK_MANUAL – Papel *kraft*, com filtração manual;

PK_15MIN – Papel *kraft*, com filtração de 15 minutos;

PK_2H – Papel *kraft*, com filtração 2 horas;

PK_SECO – Papel *kraft*, sem filtração;

PI_2H – Papel impressão com filtração 2 horas;

90D_S.P_T.A._MANUAL – 90 dias de cura, sem uso de película aderente, cura a temperatura ambiente e processo de filtração manual;

90D_C.P_T.A._MANUAL – 90 dias de cura, com uso de película aderente, cura a temperatura ambiente e processo de filtração manual;

90D_S.P_T.A._15MIN – 90 dias de cura, sem uso de película aderente, cura a temperatura ambiente e processo de filtração de 15 minutos;

90D_C.P_T.A._15MIN – 90 dias de cura, com uso de película aderente, cura a temperatura ambiente e processo de filtração 15 minutos;

90D_S.P_T.A._2H – 90 dias de cura, sem uso de película aderente, cura a temperatura ambiente e processo de filtração de 2 horas;

90D_C.P_T.A._2H – 90 dias de cura, com uso de película aderente, cura a temperatura ambiente e processo de filtração 2 horas;

90D_S.P_E_MANUAL – 90 dias de cura, sem uso de película aderente, cura em estufa e processo de filtração manual;

90D_C.P_E_MANUAL – 90 dias de cura, com uso de película aderente, cura em estufa e processo de filtração manual;

90D_S.P_E_15MIN – 90 dias de cura, sem uso de película aderente, cura em estufa e processo de filtração 15 minutos;

90D_C.P_E_15MIN – 90 dias de cura, com uso de película aderente, cura em estufa e processo de filtração 15 minutos;

90D_S.P_E_2H – 90 dias de cura, sem uso de película aderente, cura em estufa e processo de filtração de 2 horas;

90D_C.P_E_2H – 90 dias de cura, com uso de película aderente, cura em estufa e processo de filtração 2 horas;

PK_SECO_70%CEM_SECO – Papel *kraft*, sem filtração, com 70% de cimento na sua constituição e sem ter contacto com água;

PK_SECO_70%CEM_HUMIDO – Papel *kraft*, sem filtração, com 70% de cimento na sua constituição e saturado durante 24 horas;

PK_SAT.2H_70%CEM_SECO – Papel *kraft*, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição e sem ter contacto com água;

PK_SAT.2H_70%CEM_HUMIDO – Papel *kraft*, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição e saturado durante 24 horas;

PI_SAT.2H_70%CEM_SECO – Papel de impressão, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição e sem ter contacto com a água;

PI_SAT.2H_70%CEM_HUMIDO – Papel de impressão, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição e saturado durante 24 horas;

PI_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_HUMIDO – Papel de impressão, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição, 1 de volume de areia e saturado durante 24 horas;

PI_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_SECO – Papel de impressão, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição, 1 de volume de areia e sem ter contacto com a água;

PI_SAT.2H_70%CEM_2AREIA_HUMIDO – Papel de impressão, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição, 2 de volume de areia e saturado durante 24 horas;

PI_SAT.2H_70%CEM_2AREIA_SECO – Papel de impressão, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição, 2 de volume de areia e sem ter contacto com a água;

PI_SAT.2H_70%CEM_4AREIA_HUMIDO – Papel de impressão, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição, 4 de volume de areia e saturado durante 24 horas;

PI_SAT.2H_70%CEM_4AREIA_SECO – Papel de impressão, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição, 2 de volume de areia e sem ter contacto com a água;

PK_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_HUMIDO – Papel de *kraft*, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição, 1 de volume de areia e saturado durante 24 horas;

PK_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_SECO – Papel de *kraft*, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição, 1 de volume de areia e sem ter contacto com a água;

PK_SAT.2H_70%CEM_2AREIA_HUMIDO – Papel de *kraft*, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição, 2 de volume de areia e saturado durante 24 horas;

PK_SAT.2H_70%CEM_2AREIA_SECO – Papel de *kraft*, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição, 2 de volume de areia e sem ter contacto com a água;

PK_SAT.2H_70%CEM_4AREIA_HUMIDO – Papel de *kraft*, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição, 4 de volume de areia e saturado durante 24 horas;

PK_SAT.2H_70%CEM_4AREIA_SECO – Papel de *kraft*, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição, 4 de volume de areia e sem ter contacto com a água;

PK_SECO_70%CEM – Papel *kraft*, sem filtração e com 70% de cimento na sua constituição;

PK_SAT.2H_70%CEM – Papel *kraft*, filtração de 2 horas e com 70% de cimento na sua constituição;

PI_SAT.2H_70%CEM – Papel impressão, filtração de 2 horas e com 70% de cimento na sua constituição;

PI_SAT.2H_70%CEM_1AREIA – Papel impressão, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição e 1 volume de areia na sua constituição;

PI_SAT.2H_70%CEM_2AREIA – Papel impressão, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição e 2 volume de areia na sua constituição;

PI_SAT.2H_70%CEM_4AREIA – Papel impressão, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição e 4 volume de areia na sua constituição;

PK_SAT.2H_70%CEM_1AREIA – Papel *kraft*, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição e 1 de volume de areia;

PK_SAT.2H_70%CEM_2AREIA – Papel *kraft*, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição e 2 de volume de areia;

PK_SAT.2H_70%CEM_4AREIA – Papel *kraft*, filtração de 2 horas, com 70% de cimento na sua constituição e 4 de volume de areia.

Índice de Figuras

Figura 1 - Variação das diferentes resistências à flexão aos 7 dias com diferentes percentagens de papel desperdiçado (<i>Solahuddin e Yahaya, 2021</i>)	8
Figura 2 - Variação das diferentes resistências à flexão aos 28 dias com diferentes percentagens de papel desperdiçado (<i>Solahuddin e Yahaya, 2021</i>)	8
Figura 3 - Força das misturas após 28 dias (<i>Syed Kaiser, Maqbool e Ayaz Mohmood, 2016</i>)	10
Figura 4 - Absorção de água nos provetes A, B e C (<i>Ahmad et al., 2021</i>)	11
Figura 5 - Condutividade térmica dos provetes A, B e C (<i>Ahmad et al., 2021</i>)	12
Figura 6 - Polpa de celulose (Papel: história, composição, tipos, produção e reciclagem, 2022)	16
Figura 7 - Resíduo da produção de pasta <i>kraft</i> e de fibras de papel reciclado.....	17
Figura 8 - Papel de Impressão utilizado	18
Figura 9 - Papel desagregado no recipiente.....	19
Figura 10 - Trituração do papel de impressão	20
Figura 11 - Resíduo de papel <i>kraft</i> totalmente saturado e imerso em água	20
Figura 12 - Filtragem do resíduo de papel <i>kraft</i>	21
Figura 13 - Papel de impressão após ser coado	21
Figura 14 - Papel de impressão após ser retirado da estufa	21
Figura 15 - Traço 1:1.....	23
Figura 16 - Traço 1:2.....	23
Figura 17 - Misturadora utilizada	23
Figura 18 - Um dos moldes utilizados	23
Figura 19 - Compactador	23
Figura 20 - Corte dos provetes na serra elétrica.....	25
Figura 21 - Provetes após serem cortados	25
Figura 22 - Temperatura ambiente, com película.....	25
Figura 23 - Temperatura ambiente, sem película.....	25
Figura 24 - Na estufa a 40 ° C, sem película aderente	25
Figura 25 - Na estufa a 40 ° C, com película aderente.....	25
Figura 28 - Mesa de espelhamento.....	26
Figura 27 - Molde troncocónico.....	26
Figura 26 - Pilão	26
Figura 29 - Molde antes de ser testado	26
Figura 30 - Molde após ser testado.....	26
Figura 31 - Medição do espalhamento do provete.....	27
Figura 34 - Provelte após ser ensaiado	27
Figura 32 - <i>Lloyd LR50k</i>	27
Figura 33 - Provelte antes de ser ensaiado	27
Figura 35 - Provelte antes de ser ensaiado	28
Figura 36 - Molde para tornar o provete 5 x 5	28
Figura 37 - Moldes após serem comprimidos.....	28
Figura 38 - Compressão de 1 molde.....	28
Figura 39 - Balança utilizada durante o ensaio	29
Figura 40 - Recipiente utilizado	29

Figura 41 - Imagem retirada da norma BS EN1015-18:2002 de como colocar os provetes	30
Figura 43 - Antes de ser ensaiado	32
Figura 44 –Depois de ser ensaiado	32
Figura 42 - Máquina <i>Lloyd</i> equipada para a realização de ensaios à flexão	32
Figura 45 - Provetes após ensaio à flexão	33
Figura 46 - a) Secção trapezoidal, (b) Secção retangular (Catarina et al., 2021)	34
Figura 47 - Regulador de temperatura.....	34
Figura 48 - Placa com o molde colocado	34
Figura 49 - Prototherm (1-Temperatura ambiente / 2-Temperatura <i>output</i> / 3-Temperatura <i>input</i>)	35
Figura 50 - Variação do teor de humidade em função do tempo com a utilização de um micro-ondas	39
Figura 51 - Variação do teor de humidade em função do tempo com recurso a um processo de filtração do papel	39
Figura 52 - Variação da força de compressão em função do deslocamento	44
Figura 53 - Diferença entre os provetes com e sem película nos provetes de 70%	44
Figura 54 - Diferença entre os provetes com e sem película nos provetes de 50%	44
Figura 55 - Diferença entre os provetes com e sem película nos provetes de 50%	45
Figura 56 - Variação de percentagem de cimento em função da tensão à compressão para os provetes sujeitos a um processo de filtração de 15 min	46
Figura 57 - Variação de percentagem de cimento em função da tensão à compressão para os provetes sujeitos a um processo de filtração de 2H	46
Figura 58 . Tensão à compressão para as amostras que não possuem areia na sua composição.....	49
Figura 59 - Tensão à compressão para as amostras com areia e papel de impressão na sua génese.....	49
Figura 60 - Tensão à compressão para as amostras com areia e papel de <i>kraft</i> na sua génese.....	50
Figura 61 - Tensão à compressão de todos os provetes realizados	51
Figura 62 - Tensão à flexão para as amostras que não possuem areia na sua composição.....	52
Figura 63 - Tensão à flexão para as amostras com areia e papel de impressão na sua génese.....	53
Figura 64 - Tensão à flexão para as amostras com areia e papel de <i>kraft</i> na sua génese.....	54
Figura 65 - Tensão à compressão de todos os provetes realizados	55
Figura 66 - Coeficiente médio de absorção de água por capilaridade para as amostras que não possuem areia na sua composição	56
Figura 67 - Absorção de água por capilaridade para as amostras que não possuem areia na sua composição	57
Figura 68 - Absorção de água por capilaridade para as amostras que não possuem areia na sua composição	57
Figura 69 - Coeficiente médio de absorção de água por capilaridade para as amostras com areia e papel de impressão na sua génese	58
Figura 70 - Absorção de água por capilaridade para as amostras com areia e papel de impressão na sua génese	58
Figura 71 - Absorção de água por capilaridade nos intervalos de 15 a 90 minutos para as amostras com areia e papel de impressão na sua génese	58
Figura 72 - Coeficiente médio de absorção de água por capilaridade para as amostras com areia e papel <i>kraft</i> na sua génese.....	59
Figura 73 - Absorção de água por capilaridade para as amostras com areia e papel <i>kraft</i> na sua génese59	59

Figura 74 - Absorção de água por capilaridade nos intervalos de 15 a 90 minutos para as amostras com areia e papel <i>kraft</i> na sua génese.....	60
Figura 75 - Coeficiente médio de absorção de água por capilaridade de todos os provetes realizados	61
Figura 76 - Absorção de água por capilaridade de todos os provetes realizados	62
Figura 77 - Coeficiente médio de absorção de água para os intervalos de 15 a 90 minutos por capilaridade de todos os provetes realizados.....	62
Figura 78 - Capilaridade em todos os provetes após 90 min (6 á esquerda) e 15 min (restantes)	63
Figura 79 - Absorção média de água por imersão para as amostras que não possuem areia na sua composição	63
Figura 80 - Absorção média de água por imersão para as amostras com areia e papel de impressão na sua génese	64
Figura 81 - Absorção média de água por imersão para as amostras com areia e papel <i>kraft</i> na sua génese	64
Figura 82 - Absorção média de água por imersão para as amostras com areia e papel de impressão na sua génese	65
Figura 83 - Condutividade térmica para as amostras que não possuem areia na sua composição	66
Figura 84 - Resistência térmica para as amostras que não possuem areia na sua composição	66
Figura 85 - Fluxo de calor para as amostras que não possuem areia na sua composição	67
Figura 86 - Condutibilidade térmica para as amostras com areia e papel de impressão na sua génese ..	67
Figura 87 - Resistência térmica para as amostras com areia e papel de impressão na sua génese	68
Figura 88 - Fluxo de calor para as amostras com areia e papel de impressão na sua génese.....	68
Figura 89 - Condutibilidade térmica para as amostras com areia e papel de <i>kraft</i> na sua génese	69
Figura 90 - Resistência térmica para as amostras com areia e papel <i>kraft</i> na sua génese.....	69
Figura 91 - Resistência térmica para as amostras com areia e papel <i>kraft</i> na sua génese.....	69
Figura 92 - Condutibilidade térmica para todos os provetes realizados.....	71
Figura 93 - Resistência térmica para todos os provetes realizados.....	71
Figura 94 - Fluxo de calor para todos os provetes realizados	71

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Resistência à compressão (f_c – MPa) de várias misturas de papercrete (<i>Syed Kaiser, Maqbool e Ayaz Mohmood, 2016</i>)	9
Tabela 2 - Resistência à compressão (f_c – MPa) de várias misturas de papercrete (<i>Syed Kaiser, Maqbool e Ayaz Mohmood, 2016</i>).....	10
Tabela 3 Características químicas do cimento Portland de Calcário CEM II / B-L32.5N	14
Tabela 4 - Características mecânicas do cimento Portland de Calcário CEM II / B-L32.5N	14
Tabela 5 - Desempenho declarado	15
Tabela 6 - Granulometria declarada	16
Tabela 7 - Velocidades normalizadas da pá da misturadora.....	24
Tabela 8 - Quadro de todas as composições em volume utilizadas neste trabalho experimental	42
Tabela 9 - Resistência à compressão de todos os provetes realizados.....	47
Tabela 10 - Resistência à compressão de todos os provetes realizados (continuação)	48
Tabela 11 - Tensão à compressão de todos os provetes realizados na segunda fase dos testes à compressão	51
Tabela 12 - Tensão à flexão de todos os provetes realizados	55
Tabela 13 - Coeficiente médio de absorção de água por capilaridade de todos os provetes realizados....	61
Tabela 14 - Absorção média de água por imersão para todos os provetes realizados	65
Tabela 15 - Quadro geral dos resultados térmicos para todos os provetes realizados	70
Tabela 16 - Condutibilidade térmica de isolantes térmicos geralmente utilizados em obra	72
Tabela 17 - Observação binocular das amostras sem areia na sua gênese	73
Tabela 18 - Observação binocular das amostras com areia e papel de impressão na sua gênese (continuação)	74
Tabela 19 - Observação binocular das amostras com areia e papel <i>kraft</i> na sua gênese (continuação) ...	75

1. Introdução

1.1 Motivação

A construção sustentável é atualmente uma prioridade na agenda política mundial, tendo sido definidas várias metas internacionalmente, tal como atingir a neutralidade carbónica em 2050.

O direito à habitação é indispensável à vida de qualquer ser humano. No entanto, o elevado custo de vida, tanto nos países desenvolvidos como nos países em desenvolvimento, o custo elevado dos materiais de construção, como o aço e o cimento, conduz ao desalojamento e/ou precariedade de condições de milhões de pessoas, por estas não possuírem recursos económicos suficientes.

Em simultâneo, ao longo do tempo, tem sido possível verificar que as fontes naturais de alguns materiais de construção, como é o caso dos agregados para betão, estão a reduzir-se significativamente.

Assim, e tendo em conta todos estes fatores preocupantes, propõem-se o uso de um material eco eficiente, o *Papercrete*, que consiste numa mistura de água e cimento (ou outro ligante, como a cal ou o gesso) com fibra de celulose (proveniente de papel reciclado), sendo também um material de fácil produção e economicamente acessível, desde que haja abundância de resíduos de papel. Na base de produção deste material encontra-se o papel, um material facilmente reciclável que não tem vindo a ser reaproveitado como deveria ser.

O *Papercrete* é aplicado de uma forma empírica em grande parte do mundo. No entanto, não existem muitos estudos, e parece não existir produção industrial de *Papercrete*.

1.2 Objetivos

O objetivo principal será a produção de uma argamassa sustentável, tendo o papel como agregado reciclado em conjunto com ligantes. Serão definidas várias variáveis de estudo como a quantidade de papel, quantidade de água, quantidade de cimento e diferentes tipos de papel.

Através da introdução de cada variável será possível obter diferentes misturas, tendo em vista a determinação das suas principais características, possibilitando o estudo através de ensaios laboratoriais das suas propriedades físicas e mecânicas: a resistência à flexão, a resistência à compressão, a condutividade térmica, entre outros. Estes ensaios permitirão aprofundar o conhecimento do material de forma a qualificar o seu desempenho e assim, contribuir para a massificação do seu uso

O resultado esperado após a finalização dos estudos, é a obtenção de uma mistura melhorada de *Papercrete*, assim como indicar qual a sua funcionalidade no futuro, transformando a sua utilização numa escolha segura e viável.

1.3 Metodologia

Deste modo, foram utilizados resíduos de papel de impressão (de fácil obtenção) e resíduos provenientes da indústria do papel *kraft*, misturados com um material ligante, o cimento, e com um material agregado, a areia. Através de vários ensaios realizados em laboratório, foi possível caracterizar a nível geral o desempenho deste material, nomeadamente algumas características mecânicas do mesmo.

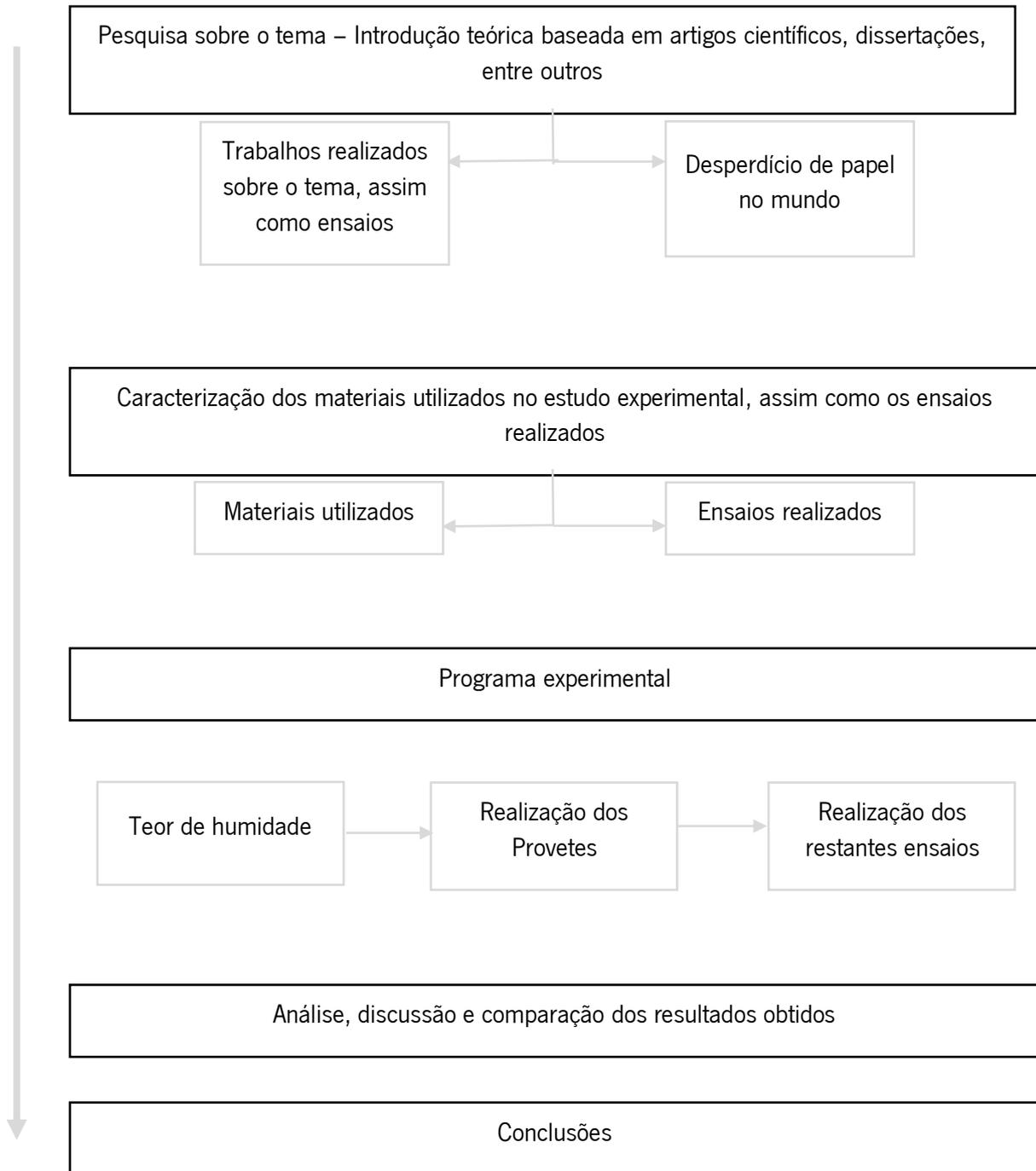
Inicialmente, foi necessário realizar uma pesquisa sobre o tema abordado, recorrendo sobretudo a artigos científicos e outras dissertações sobre o tema em questão ou semelhante.

Em seguida, foi necessário realizar uma parte mais prática que consistiu no desenvolvimento de diferentes misturas de *papercrete* para, posteriormente, poderem ser ensaiadas para a avaliação do seu desempenho mecânico e térmico, permitindo selecionar quais as melhores composições para a produção de *papercrete*.

Sintetizando, a caracterização laboratorial da composição selecionada para avaliar o desempenho geral enquanto solução construtiva, teve por base as seguintes características:

- A resistência à água;
- A resistência mecânica;
- A resistência térmica.

Para uma interpretação mais fácil pode ser observado o seguinte esquema que ilustra de forma simples as interações existentes em cada fase.



1.4 Estrutura de Dissertação

Para além do presente capítulo, este trabalho compreende ainda mais quatro, distribuídos e organizados da forma a seguir representada.

No Capítulo 2 (estado do conhecimento e revisão bibliográfica) é realizado um enquadramento do desperdício de papel por todo o mundo, o que é o *papercrete* e quais as suas possíveis aplicações e ensaios realizados a amostras de *papercrete* observados em outras dissertações de forma a obter um termo de comparação.

Os aspetos mais importantes relacionados com a caracterização dos procedimentos laboratoriais, assim como dos materiais utilizados para a realização dos mesmos estão apresentados no capítulo 3. Neste capítulo serão apresentados todos os materiais utilizados na elaboração de todos os ensaios , assim com explicadas todas as normas que foram seguidas para a realização do mesmo.

De forma a poder analisar os resultados em todos os procedimentos laboratoriais realizados, foi elaborado o capítulo 4. Este capítulo ilustra e analisa os resultados obtidos nos ensaios do teor de humidade, ensaios de resistência mecânica (flexão, compressão), ensaios de absorção de água por imersão e capilaridade e ensaios térmicos.

Por fim no capítulo 5 irá ser elaborada uma conclusão acerca do trabalho experimental realizado, onde irão ser referidas as suas possíveis aplicações, comparação de todos os resultados obtidos e uma breve argumentação crítica sobre o trabalho realizado.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Desperdício de papel

Ao longo dos anos temo-nos deparado com uma grande problemática, a quantidade de desperdício de papel, de tal forma que nos países desenvolvidos é considerada a terceira maior fonte de poluição ambiental (Lage et al., 2016). O seu número tem vindo a aumentar bastante, o que leva à necessidade de criação de mais espaços de aterro, causando, assim, uma maior perda de recursos naturais, aumentando as despesas e levando a vários tipos de poluição (Solahuddin e Yahaya, 2021). Contudo, caso o papel não seja aterrado ou reciclado, a opção passa pela inceneração do mesmo, provocando a emissão de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera, uma questão transversal a todas as nações do mundo (C. Choi, H. Yun e H. Jung, 2018). Também a produção e utilização de cimento na indústria da construção é responsável pela emissão de CO₂ para a atmosfera (Ahmad et al., 2021). Atualmente, os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) estão em crescimento, de tal forma que ultrapassam o desenvolvimento urbano (Awoyera, Olalusi e Babagbale, 2021). Os RSU gerados per-capita mundialmente, subiram de 0,64 kg/dia em 2002 para 1,2 kg/dia em 2012. Ocorrendo a nível global um aumento de 87,5% da produção de lixo por pessoa/dia durante 10 anos, prevê-se um aumento de 3,45% na população global de resíduos urbanos (nesse período de 10 anos), levando a uma estimativa de que até ao ano de 2025 irá ocorrer um aumento de cerca de 1,42 kg/capita (Awoyera, Olalusi e Babagbale, 2021).

Em termos ambientais, o uso do papel na construção é importante pois oferece uma excelente alternativa à criação de aterros ou à inceneração do mesmo. A sua utilização poderá permitir a redução do uso de agregados finos (areia), diminuindo o impacto ambiental por exploração de recursos naturais. Por outro lado, a incorporação do papel, confere características de isolamento térmico, reduzindo a necessidade de utilização de materiais isolantes, por substituição, nem que seja parcial, de vários como: o poliestireno expandido (EPS), lã mineral, celulose, poliuretano, madeira e cortiça, normalmente dispendiosos, por um material, o *Papercrete*, dotado de uma densidade mais baixa e levando à redução da sua condutividade térmica (P.K. Latha, Y.Darshana e Vidhya Venugopal, 2015).

2.2 Papercrete

Papercrete é o nome dado a um novo material de construção constituído por cimento, água e desperdícios de papel. Este material tem o intuito de diminuir o consumo de agregados (areia) na construção, contudo, como todas as argamassas, este necessita da utilização de alguns materiais ligantes como é o caso do cimento (*Solahuddin e Yahaya, 2021*). Sendo que, o papel é composto por celulose de madeira, que é de fácil obtenção, pois é o segundo material mais abundante no planeta terra, apenas ultrapassado pelas rochas (*C. Choi et al., 2018*). O uso destas fibras de celulose confere ainda ao *Papercrete* a capacidade de reduzir a condutividade térmica, melhorar o desempenho acústico, permitindo uma melhor absorção sonora, reduzir a densidade e a resistência à flexão e conter o desenvolvimento de fendas de microfissuras. Contudo, ainda existe uma grande dificuldade na aplicação deste material, por ainda não existirem normas e diretrizes apropriadas (*P.K. Latha, Y.Darshana e Vidhya Venugopal, 2015*).

Além de promover a reciclagem do desperdício do papel, pode ainda ser utilizado em paredes interiores de um edifício, mesmo em regiões sismicamente ativas devido ao seu reduzido peso próprio, quando comparado com as argamassas mais comuns. Também, o uso do *papercrete*, na construção de paredes, irá provocar uma diminuição do peso próprio atuante sobre a estrutura, levando a uma diminuição das dimensões das fundações, da quantidade de aço utilizado, reduzindo significativamente a quantidade de mão-de-obra e as despesas energéticas (*Solahuddin e Yahaya, 2021*).

2.3. Experiências realizadas com *papercrete*

Através da análise de alguns trabalhos realizados no âmbito do estudo do *papercrete*, é possível compilar algumas propriedades do material que já foram estudadas, para que no capítulo de análise e discussão de resultados, possa ter algum termo de comparação com o trabalho experimental realizado.

2.3.1 Resistência à Flexão

Os resultados do ensaio de resistência do *papercrete* à rutura por flexão de provetes endurecidos aos 7 e 28 dias são apresentados por (*Solahuddin e Yahaya, 2021*). Estes autores

estudaram a adição de papel de desperdício de fotocopiadora (SCPWP) e papelão triturado de resíduo de papel (SCBWP) .

Através da análise das Figuras 1 e 2, verifica-se que a resistência à rutura por flexão da argamassa aumenta entre 5% e 10% com a adição de SCPWP e SCBWP tanto aos 7 como aos 28 dias de idade, respetivamente. Contudo, os provetes com 15% de incorporação apresentam uma queda em relação aos de 5% e 10%, tendo até resistências à flexão mais baixas que a composição de referência, sem incorporação dos resíduos de papel (Solahuddin e Yahaya, 2021).

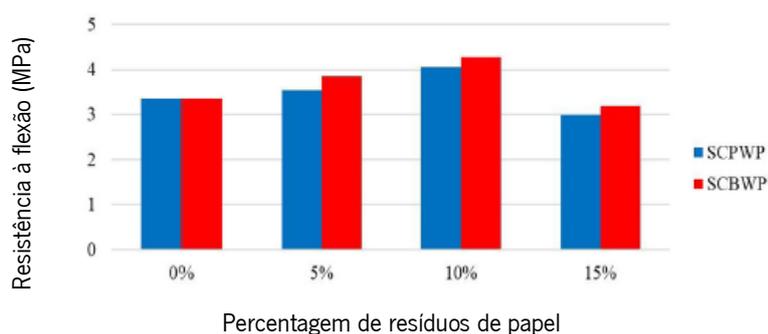


Figura 1 - Variação das diferentes resistências à flexão aos 7 dias com diferentes percentagens de papel desperdiçado (Solahuddin e Yahaya, 2021)

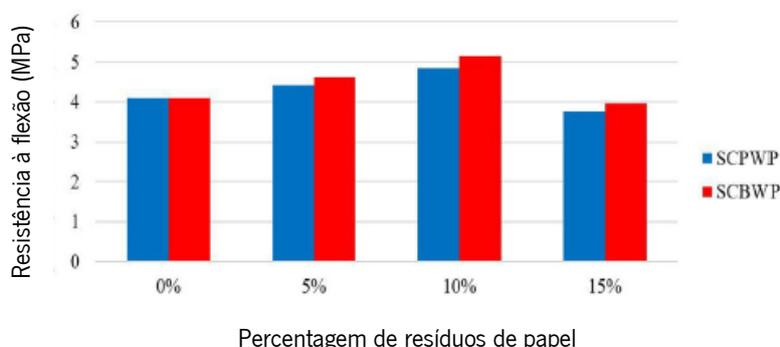


Figura 2 - Variação das diferentes resistências à flexão aos 28 dias com diferentes percentagens de papel desperdiçado (Solahuddin e Yahaya, 2021)

Pode-se analisar que, neste ensaio, as percentagens com maior desempenho foram as de 5% e 10%. O valor mais alto da resistência à flexão aos 7 dias foi de 4,27 MPa e corresponde a 10% de incorporação de SCBWP, enquanto o valor mais baixo foi de 2,98 MPa, correspondendo a 15% de SCPWP. O maior valor registado aos 28 dias também foi com 10% de SCBWP, aumentando

a sua resistência para 5,15 MPa. Contudo, o valor mais baixo de resistência também foi registado para 15%, mas de incorporação de SCPWP (Solahuddin e Yahaya, 2021).

É possível ainda observar que, para ambos os resíduos de papel estudados, a incorporação com melhores resultados foi a de SCBWP, sendo este sempre foi maior que a de SCPWP (Solahuddin e Yahaya, 2021).

2.3.2. Resistência à Compressão

Neste ensaio, pode-se observar que a resistência do *Papercrete* é inferior à do betão convencional. As diversas misturas utilizadas por (Syed Kaiser, Maqbool e Ayaz Mohmood, 2016) podem ser observadas na Tabela 1 e foram testadas decorridos 28 dias de idade. Como visto na Figura 3, a melhor proporção de papel (P), cimento (C) e areia (A) é a que possui um traço que no artigo científico não está muito perceptível, pois não faz nenhuma referencia direta a se foi considerado em volume ou massa é 60:20:20, apresentando a maior resistência à compressão. É importante observar que este material apresenta uma massa volúmica muito baixa (10 vezes inferior) em relação ao betão convencionalmente utilizado em obra (23000 kg/m^3). O *papercrete* também apresenta outra grande vantagem em relação ao betão convencional, o facto de ser um material mais dúctil e que tem melhores propriedades de absorção de choque, como pode ser visto na Tabela 2.

Tabela 1 - Resistência à compressão (f_c – MPa) de várias misturas de *papercrete* (Syed Kaiser, Maqbool e Ayaz Mohmood, 2016)

N.A.	Relação de mistura (p : c: a)	Número de amostras	Resistência obtida aos 28 dias (MPa)			Força média (MPa)
			Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	
1	50:40:10	3	2,60	2,80	2,70	2,70
2	50:30:20	3	1,50	2,00	1,74	1,75
3	50:20:30	3	1,80	1,70	1,75	1,75
4	50:10:40	3	0,50	0,40	0,44	0,45
5	60:30:10	3	0,60	0,80	1,60	0,65
6	60:20:20	3	6,5	6,50	4,00	6,50
7	50:50:00	3	1,50	1,80	0,65	1,65

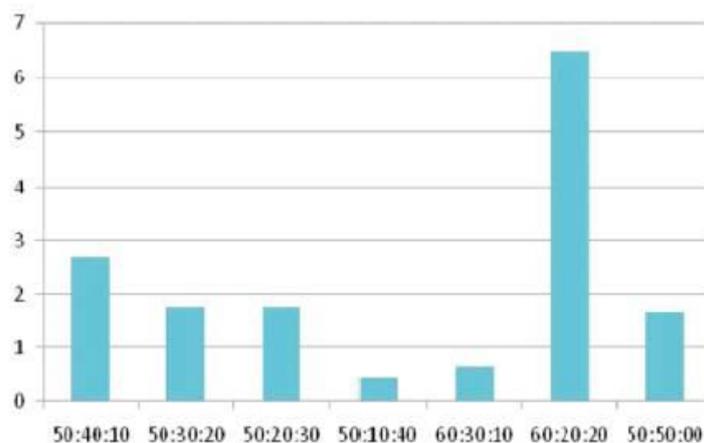


Figura 3 - Força das misturas após 28 dias (Syed Kaiser, Maqbool e Ayaz Mohmood, 2016)

Tabela 2 - Resistência à compressão (f_c – MPa) de várias misturas de *papercrete* (Syed Kaiser, Maqbool e Ayaz Mohmood, 2016)

N. A.	Argamassa		Força média de compressão			
	Grau	f_c	Madeira Tipo	f_c	<i>Papercrete</i> Rácio (P:C: A)	f_c
1	M15	15	Choupo (sem grão)	4,49	50:40:10	2,7
2	M20	20	Bétula (sem grão)	7,83	50:30:20	1,75
3	M25	25	Madeira vermelha (sem grão)	2,66	50:20:30	1,75
4	M30	30	Madeira vermelha (sem grão)	28,96	50:10:40	0,45
5	M35	35	Contraplacado	20,76	60:30:10	0,65
6	M40	40	Bétula (com grão)	61,25	60:20:20	6,5
7	M45	45	Choupo (com grão)	43,26	50:50:00	1,65

2.3.3. Absorção de água

Através da análise da Figura 4, podemos observar os resultados dos ensaios de absorção de água efetuados por (Ahmad et al., 2021), nos diferentes provetes que foram alvo de análise neste trabalho experimental. Os 3 provetes de cada composição foram produzidos com um traço (cimento, papelão, areia) em volume diferente, sendo o Tipo A (1:1:1,5), Tipo B (1:1:2) e Tipo C (1:2:4) (Ahmad et al., 2021).

É possível observar que os provetes de tipo A foram o que absorveram menos água, enquanto os provetes do Tipo C, que contém uma maior quantidade de papelão possuíram uma maior absorção da mesma. Tendo em conta a ASTM C1634-17, os blocos que absorvem mais de 15% de água são classificados como sujeitos a degradação severa (*severe weathering* (SW)),

quando estes absorvem 10% ou menos são denominados como degradação negligente (*negligible weathering* (NW)) e, por fim, caso se encontrem entre estas duas percentagens são classificadas como degradação moderada (*moderated weathering*). Como se pode observar no Figura 4 os provetes A e B encontram-se abaixo de NW, enquanto o provete C se encontra bastante próximo do limite de SW. Por isso, a sua utilização em obra deve ser reduzida, devido a uma maior capacidade de absorção de água (*Ahmad et al., 2021*).

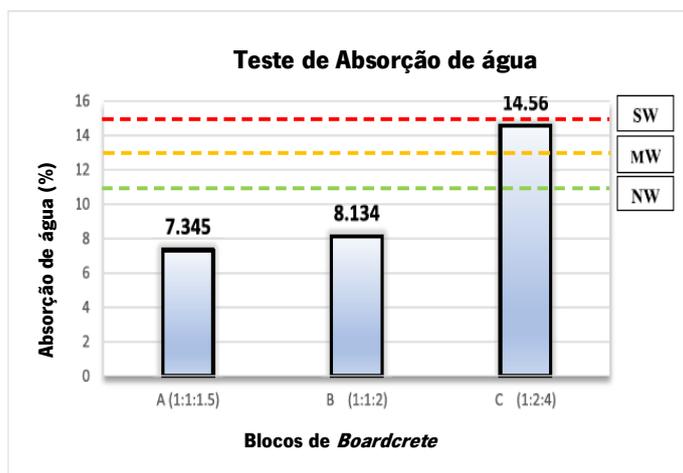


Figura 4 - Absorção de água nos provetes A, B e C (*Ahmad et al., 2021*)

2.3.4. Condutividade Térmica

A Figura 5 demonstra a variação de temperatura ao longo do comprimento do provete ensaiado. Os provetes ensaiados demoraram cerca de 4h para atingirem o equilíbrio térmico. Foram ensaiadas as amostras do Tipo A (1:1:1.5), Tipo B (1:1:2) e Tipo C (1:2:4), que estão representadas na Figura 5 a partir de cada linha (*Ahmad et al., 2021*).

É visível que a amostra do Tipo A possui a maior condutividade térmica, que é 1,150 W/m.K, em relação à mistura B (1,08 W/m.K) e do Tipo C (0,94 W/m.K). Pode-se deduzir que o aumento da quantidade de papelão provoca uma diminuição da condução térmica (*Ahmad et al., 2021*).

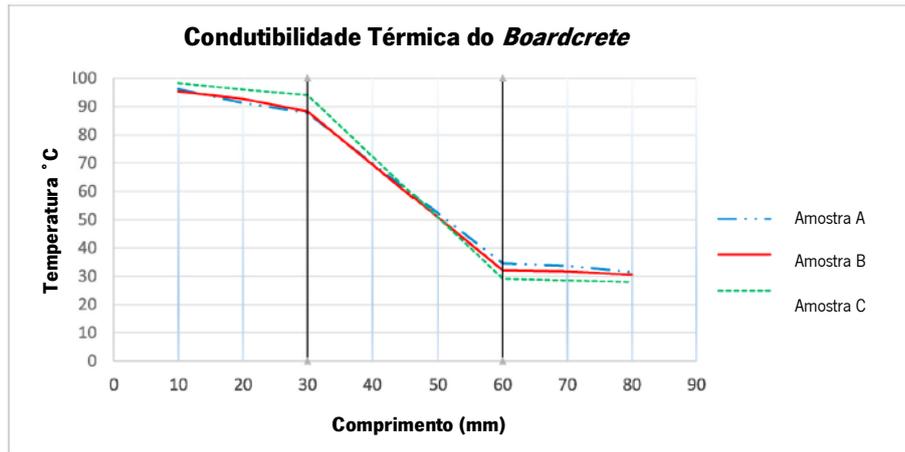


Figura 5 - Condutividade térmica dos provetes A, B e C (Ahmad et al., 2021)

3. Materiais e procedimentos de ensaio

3.1. Materiais

Neste capítulo irão ser abordados todos os materiais utilizados ao longo do desenvolvimento deste trabalho experimental, onde serão inseridos temas como as suas características, propriedades mecânicas e físicas, assim como as diversas formas a que estes foram sujeitos.

3.1.1. Ligante

Ligante é um corpo que possui a capacidade de aderir a outros, na construção é utilizado para juntar ou aglomerar os materiais, normalmente pétreos, recobri-los com reboco ou para criar pastas plásticas, como são exemplos as argamassas e os betões (Aguiar, 2009).

Os ligantes são classificados como aéreos ou não hidráulicos, hidráulicos e hidrocarbonados. Relativamente aos ligantes aéreos, estes possuem como característica o facto de só endurecerem ao ar, temos como exemplo o gesso, a cal aérea e as anidrites. Os hidráulicos apenas endurecem tomando forma pétreo, tanto em contacto com o ar ou água, pertencem a esta família as cals hidráulicas e os cimentos. Por fim os ligantes hidrocarbonados apresentam-se no estado líquido mais ou menos viscosos, que endurecem por arrefecimento ou evaporação dos seus dissolventes, como betume e alcatrão (Aguiar, 2009).

Para a realização deste trabalho experimental apenas foi utilizado como ligante o cimento.

3.1.1.1 Cimento

Na realização deste trabalho experimental foi utilizado cimento Portland de Calcário CEM II / B-L32.5N, que tem como características uma boa trabalhabilidade e baixo calor de hidratação, possuindo cor cinzenta e um lento desenvolvimento de resistências ('FICHA_TÉCNICA_CEM_II_B-L_32,5N').

Possui como características químicas:

Tabela 3 Características químicas do cimento Portland de Calcário CEM II / B-L32.5N

Propriedades	Método de ensaio	Valor especificado
Teor de sulfatos em SO ₃	NP EN 196-2	≤3.5%
Teor de cloretos	NP EN 196-21	≤0.10%

Possui como características mecânicas:

Tabela 4 - Características mecânicas do cimento Portland de Calcário CEM II / B-L32.5N

Resistência à compressão (MPa) NP EN 196-1		
Resistência aos primeiros dias		Resistência de referência
2 dias	7 dias	28 dias
-	≥16	≥32.5 e ≥52.5

3.1.2. Agregados

Os agregados em construção são materiais com diversas formas e volumes e propriedades apropriadas para a realização de betões e argamassas. Estes possuem a capacidade de influenciar as propriedades dos materiais cimentícios endurecidos, entre as quais a absorção, densidade e dureza. Como exemplo temos as areias siliciosas correntes com diferentes granulometrias, naturais ou britadas, as areias de escórias, entre outras (Aguiar, 2009).

Neste trabalho experimental foram usados como agregados a areia fluvial natural rolada e o papel.

3.1.2.1 Areia

Um dos agregados utilizados neste trabalho experimental foi a areia, mais propriamente areia do rio, fornecida pela empresa Extractopuro, LDA. De acordo com a declaração de desempenho que poderá ser observada na Tabela 5, trata-se de uma areia quartzosa, constituída por partículas subprismáticas, subangulosas e rugosas / ligeiramente rugosas, à base de Quartzito, Feldspato, Xisto, Moscovite e Biotite.

Esta areia respeita as normas EN 12620:2002+A1:2008 de agregados para betão, EN 13139:2002 de agregados para argamassas, EN 13242:2002+A1:2007 de agregados para materiais não ligados ou tratados com ligantes hidráulicos utilizados em trabalhos de engenharia civil e na construção rodoviária.

As características deste material podem ser observadas nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Desempenho declarado

Características essenciais		Normas Harmonizadas		
		EN 12620:2002 + A1:2008	EN 13139:2002	EN 13242:2002+ A1:2007
Dimensão Nominal		0/4		
Granulometria		G,85	-	G,85; G _{TF} 10
Teor de finos		f ₃	Categoria 1	f ₃
Qualidade dos finos (EA)		NA	NA	NA
Massa volúmica	Material impermeável	(2,61±0,05) Mg/m ³		
	Partículas secas em estufa	(2,58±0,05) Mg/m ³		
	Partículas saturadas	(2,59±0,05) Mg/m ³		
Absorção de água		≤0,5%		
Cloretos solúveis em água		≤0,01%		NA
Sulfatos solúveis em ácido		AS _{0,2}		
Enxofre total		≤1%		S ₁
Teor de Húmus		Isento (solução mais clara)		
Retração por secagem		≤0,075%	NA	NA
Carbonato de cálcio		NPD	NA	NA
Substâncias perigosas		Não tem		
Contaminantes orgânicos leves		0,2%		NA
Reatividade álcalis-silica		NPD		NA

Tabela 6 - Granulometria declarada

Granulometria declarada		
Peneiro (mm)	Passados (%)	Limites (%)
8	100	100
6,3	99	98 - 100
4	95	90 - 100
2	90	80 - 100
1	77	57 - 97
0,5	33	-
0,25	4	0 - 24
0,125	1	-
0,063	0,5	0,0 - 3,0

3.1.2.2 Papel

Outro material utilizado como agregado foi o papel. Este é um produto que normalmente é constituído por elementos fibrosos de origem vegetal, apresentando-se habitualmente na forma de rolos ou folhas. Este material é obtido a partir de uma matéria-prima que possui na sua constituição elementos fibrosos. De um ponto de vista químico, o papel é basicamente constituído por ligações de hidrogénio (*Papel: História, Composição, Tipos, Produção e Reciclagem, 2022*).

As fibras (Figura 6) utilizadas na sua composição necessitam de alto conteúdo de celulose, também conhecida como polpa de madeira de árvores. O baixo custo e fácil obtenção são as razões pelas quais as fibras vegetais são as mais utilizadas (*Papel: História, Composição, Tipos, Produção e Reciclagem, 2022*).

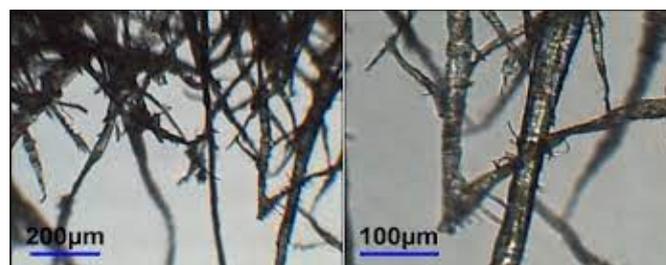


Figura 6 - Polpa de celulose (*Papel: história, composição, tipos, produção e reciclagem, 2022*)

Existem diversos tipos de papel criados ao longo dos tempos como: papel ácido, papel alcalino, papel artesanal, papel de impressão, papel bíblia, papel-cartão, papel couché, papel de cera, papel de seda, *glinter*, papel higiênico, papel de jornal, papelão, papel *kraft*, papel reciclado, entre outros (*Papel: História, Composição, Tipos, Produção e Reciclagem*, 2022).

Contudo, no âmbito da realização do presente trabalho experimental, apenas foram utilizados dois tipos de papéis: resíduo da produção papel *kraft* e papel de impressão.

3.1.2.2.1. Resíduo da produção de Papel *kraft*

Este produto, à base de fibras de celulose (Figura 7), é um resíduo obtido que resulta do processamento das matérias-primas para a produção de pasta *kraft*, incluindo fibras de papel reciclado. Foi provido pela empresa Europac, localizada em Viana do Castelo.



Figura 7 - Resíduo da produção de pasta *kraft* e de fibras de papel reciclado

Este resíduo é fabricado através da operação de elementos de crivagem e possui fibras de celulose, lenhina, sais de sódio e enxofre, areias e outras impurezas. O principal interesse na utilização deste material é o custo nulo que este apresenta, tendo em conta que se trata de um resíduo obtido através do processo de transformação do papel e cartão utilizados para a reciclagem. Este é obtido através do aproveitamento das fibras de celulose existentes nos papéis usados (Lanzinha, 2021).

3.1.2.2.2. Papel de impressão

Para fazer um estudo mais amplo optou-se por variar o tipo de papel a utilizar ao longo deste projeto. De forma a facilitar o processo de caracterização do papel optou-se pela utilização de papel de impressão (Figura 8).

Este papel é obtido através de uma pasta química branca, tem alta resistência à humidade, absorve mais tinta que os outros papéis, sem revestimentos, e detém elevada resistência de superfície.

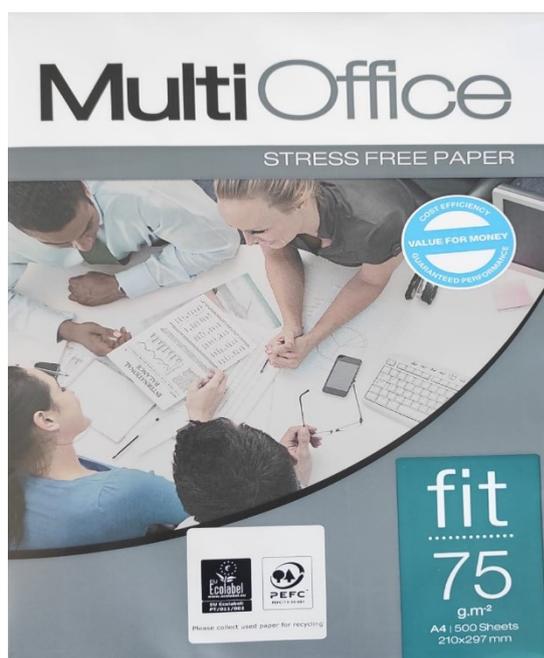


Figura 8 - Papel de Impressão utilizado

3.2. Procedimentos de Ensaio

Nesta fase serão abordados todos os ensaios realizados neste trabalho experimental, tal como todos os cuidados e normas seguidas para a realização dos mesmos.

Os ensaios realizados foram: teor de humidade, espalhamento, ensaio à compressão, ensaio térmico, ensaio à flexão, ensaio à absorção por imersão e capilaridade.

A partir destes ensaios foram obtidos resultados, necessários para que, mais tarde, possam ser discutidos, analisados e interpretados da melhor forma.

3.2.1 Teor de humidade

Tendo em conta que o uso do papel em argamassas e betões é recente, ainda não possui as próprias normas. Desta forma, este procedimento experimental, foi baseado na norma NP EN 1097-5,2002 , que especifica o método de ensaio para determinação do teor de humidade dos agregados em estufa ventilada.

Para a realização deste ensaio foram necessários diversos aparelhos e utensílios, desde recipientes, que devem ser inoxidáveis e permitir o seu fecho, de modo a impedir qualquer perda de água; agitador resistente ao calor; uma balança, com alcance conveniente e de precisão a 0,02% da massa do provete; uma estufa ventilada, que deve manter uma temperatura de $(110 \pm 5^\circ \text{C})$ e tabuleiros resistentes ao calor em quantidade suficiente para conter as amostras.

Numa fase inicial, tanto para o papel de impressão, como para o resíduo de papel *kraft*, foi necessário desagregar o papel e colocar num recipiente até obter a quantidade de papel necessária (Figura 9).



Figura 9 - Papel desagregado no recipiente

Nesta etapa, o papel de impressão teve um tratamento diferente do papel *kraft*, pois este último já se encontrava totalmente triturado aquando do seu recebimento. No papel de impressão foi necessário para além da desagregação manual, a sua trituração recorrendo a um instrumento adicional, uma varinha mágica, como se pode analisar na Figura 10.



Figura 10 - Trituração do papel de impressão

Em seguida, foi fundamental saturar ambos os materiais. Para que estes atingissem o seu limite de saturação (Figura 11) foi necessário esperar 24h para poder continuar a realização deste ensaio.



Figura 11 - Resíduo de papel *kraft* totalmente saturado e imerso em água

Posteriormente, foi necessário recolher 1 kg de cada material e fazer a sua filtragem, deixando libertar a água em excesso por gravidade (Figura 12) ao longo de determinados intervalos de tempo previamente definidos (0,5h,1h,2h,4h,8h).



Figura 12 - Filtragem do resíduo de papel *kraft*

Em seguida, determinou-se a massa da amostra. Esta amostra, em seguida foi colocada numa estufa durante 24 h para determinar a sua massa seca.

Por fim, para que a massa atingisse um valor constante, o tabuleiro que continha a amostra foi colocado a arrefecer à temperatura ambiente durante 1 hora. Em seguida, retirou-se e mediu-se a diferença entre a massa do provete húmido e a massa do provete seco. O processo foi repetido até que a diferença entre a duas determinações sucessivas fosse inferior a 0,1%. Figura 13 e 14.



Figura 13 - Papel de impressão após ser coado



Figura 14 - Papel de impressão após ser retirado da estufa

Por fim, a partir das diferenças das massas húmidas e secas, obteve-se o teor de humidade para, de seguida, analisar os resultados e escolher quais os melhores tempos de filtração.

Para o cálculo do teor de humidade foi utilizada a seguinte equação (1):

$$w = \frac{M1 - M3}{M3} \times 100 \quad (1)$$

Legenda:

W – Teor de humidade

M1 – Massa do provete, em gramas;

M3 – Massa constante do provete seco, em gramas.

De forma a tentar simplificar e acelerar este processo, em vez de se utilizar um processo de infiltração por gravidade utilizou-se um micro-ondas onde se deixou a pasta de papel aquecer nos seguintes períodos: 1 min, 5 min, 10 min e 15 min. Contudo o resto do processo foi realizado da mesma forma que o anterior.

3.2.2. Mistura da argamassa e preparação dos provetes

Esta etapa do projeto foi dividida em duas fases. Na fase inicial apenas foi utilizada água, papel ou resíduo de papel *kraft* e cimento. Nesta fase foi necessário fazer variar as quantidades de cimento utilizadas para a mistura, de forma a aferir qual a composição considerada satisfatória, por isso foi utilizado um método de dosagem das amostras em volume. Para isso recorreu-se ao uso de 10%, 30%, 50% e 70% em volume da quantidade de papel utilizada na mistura.

Na segunda fase, com o objetivo de avaliar qual a influência da mistura de areia, as dosagens continuaram a ser medidas em volume, adotando os traços “cimento + papel”: “ areia” 1:1, 1:2 e 1:4 (Figuras 15 e 16).



Figura 15 - Traço 1:1



Figura 16 - Traço 1:2

Para a realização das misturas estudadas, foi tida em conta a norma NP EN 196-1, 2006. Os materiais necessários foram uma misturadora, que possui um recipiente em aço inoxidável com capacidade de 5L, de maneira a ser fixado firmemente à armação do misturador durante a amassadura, de forma que esta distância seja mantida com precisão (Figura 17) e com vários tipos de velocidades e rotações (Tabela 7); moldes, neste caso foram utilizados moldes de 50x50x50 (Figura 18) e de 50x150x150 mm³ e uma mesa vibratória para compactar as misturas (Figura 19).



Figura 17 - Misturadora utilizada



Figura 18 - Um dos moldes utilizados



Figura 19 - Compactador

Tabela 7 - Velocidades normalizadas da pá da misturadora

	Rotação min	Movimento planetário mínimo
Lenta	140 ± 5	62 ± 5
Rápida	285 ± 10	125 ± 10

Na realização do procedimento de amassadura, inicialmente mediu-se a água, o cimento e o papel necessário à mistura e colocou-se, por esta ordem, no recipiente da misturadora. Posteriormente, foi acionado o misturador à velocidade lenta (Tabela 7) e iniciou-se o tempo das fases de amassadura. Após 60s, o misturador foi colocado à velocidade rápida por mais 30s, seguidamente, parou-se o misturador por 90s e, depois, retirou-se com uma espátula toda a argamassa aderente às paredes e ao fundo do recipiente, colocando-a no meio deste, para, por fim, prosseguir a amassadura à velocidade rápida durante 60s.

Finalizada a operação de mistura, procedeu-se à realização dos ensaios de espalhamento. Posteriormente, foram moldados os provetes de *papercrete*. Introduziu-se a argamassa em cada compartimento do molde, em duas camadas distintas. Em seguida, procedeu-se à compactação da primeira camada com 60 pancadas do compactador normalizado. Depois, foi colocada a segunda camada, nivelando com a espátula e, novamente, foi compactada com 60 pancadas. O excesso foi retirado com uma espátula e a argamassa contida nos moldes foi nivelada, também com a ajuda de uma espátula. Por fim, o molde foi coberto com uma película aderente, para impedir a evaporação da água do *papercrete* durante a primeira fase da cura, antes da desmoldagem. Após 48h, efetuou-se a desmoldagem dos provetes.

Para testar o efeito da incorporação de areia, todo o procedimento anteriormente explicado foi repetido, com uma alteração. Após colocar todos os materiais na misturadora, esta foi posta a funcionar durante 30s à velocidade lenta, tendo a areia sido adicionada lentamente durante 30s. Posteriormente, a misturadora foi parada durante 90s e o processo foi retomado da mesma forma, anteriormente descrita.

De forma a poder aproveitar os moldes de 150x150x50 mm³ para moldagem de provetes a serem submetidos a um posterior ensaio à flexão, imersão e capilaridade, estes provetes foram divididos em 3, ficando com dimensões de cerca de cerca de 150x50x50 mm³, conforme a Figura 21, com o recurso ao corte com uma serra elétrica (Figura 20).



Figura 20 - Corte dos provetes na serra elétrica



Figura 21 - Provetes após serem cortados

3.2.3. Cura do betão

Nesta fase do projeto, de forma a avaliar o processo de cura a adotar para o *papercrete*, testaram-se 4 formas distintas: a temperatura ambiente com ou sem aplicação de película aderente (Figuras 22 e 23) à superfície e na estufa a 40°C com ou sem película aderente (Figuras 24 e 25).



Figura 22 - Temperatura ambiente, com película



Figura 23 - Temperatura ambiente, sem película



Figura 24 - Na estufa a 40°C, sem película aderente



Figura 25 - Na estufa a 40°C, com película aderente

3.2.4. Mesa de espalhamento

De forma a conseguir quantificar a água utilizada para cada argamassa foi necessário recorrer ao ensaio da mesa de espalhamento seguindo os procedimentos estabelecidos pela Norma Europeia, mais propriamente a norma EN1015 – 3 (2004).

Para a realização deste ensaio é fundamental o recurso a uma mesa de espalhamento (Figura 28); um molde troncocónico (Figura 27); uma fita métrica; uma colher de pedreiro e um pilão (Figura 26).



Figura 28 - Pilão



Figura 27 –Molde troncocónico



Figura 26 - Mesa de espalhamento

O molde do ensaio de espalhamento foi preenchido em duas camadas, sendo cada uma delas compactadas com 10 pancadas do pilão. Depois, com a ajuda da colher de pedreiro o excesso de *papercrete* foi removido e a sua superfície alisada. Em seguida, foi retirado o molde troncocónico e, depois, com muito cuidado para não afetar a amostra que estava a ser testada, a mesa foi solicitada com 15 pancadas por segundo.

Por fim, após a realização das pancadas, mediu-se o diâmetro da amostra e verificou-se se estava dentro dos valores desejados (definido como sendo cerca de 140 mm). Se estiver maior que o pretendido significa que foi colocada água a mais, caso contrário significa que precisa de mais água. (Figuras 29,30 e 31).



Figura 29 - Molde antes de ser testado



Figura 30 - Molde após ser testado



Figura 31 - Medição do espalhamento do provete

3.2.5. Ensaio de compressão

Nesta etapa do projeto foi necessário colocar os provetes fabricados e a serem testados de forma a averiguar a sua resistência à compressão. Para que a avaliação fosse a mais rigorosa possível, todo o seu processo de ensaio foi realizado tendo em conta a norma NPEN 196-1 2006.

Na realização deste teste laboratorial foi necessário a utilização de um equipamento de ensaios de resistência à compressão que segue todas as recomendações especificadas na norma.

Os provetes foram centrados lateralmente em relação aos pratos da máquina a $\pm 0,5$ mm e longitudinalmente de modo que a base do prisma fique saliente em relação aos pratos cerca de 10 mm. Em seguida, aplicou-se a carga uniformemente à velocidade de (2400 ± 200) N/s, até à rotura, como pode ser observado nas Figuras 32, 33 e 34.

Contudo, como o *papercrete* é um material muito dúctil e deformável, não apresenta uma rotura de fácil identificação. Assim, por isso, foi fixa a força de rotura correspondente e analisada a força obtida máxima, e de forma a ser visível essa deformação todos os provetes foram comprimidos até se obter uma deformação final de 13 milímetros.



Figura 33 - Lloyd LR50k



Figura 34 - Provette antes de ser ensaiado



Figura 32 - Provette após ser ensaiado

Contudo, também foram ensaiados à compressão metades de provetes que já tinham sido ensaiados à flexão. De forma a conseguir ensaiar os provetes da melhor forma possível utilizou-se um molde de cubo com medidas de 5 x 5 milímetros, como é visível nas Figuras 35, 36, 37 e 38.



Figura 35 - Provette antes de ser ensaiado

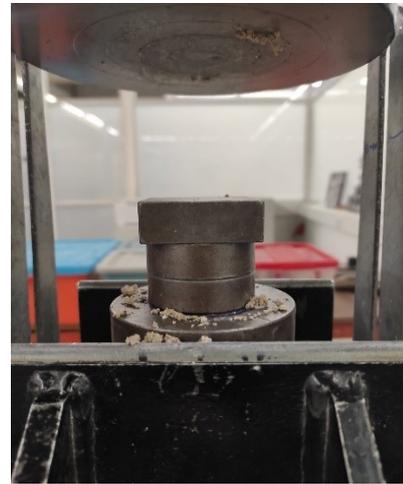


Figura 36 - Molde para tornar o provete 5 x 5



Figura 37 - Moldes após serem comprimidos



Figura 38 - Compressão de 1 molde

Para o cálculo da resistência à compressão, recorreu-se à seguinte equação (2):

$$R_c = \frac{F_c}{2500} \quad (2)$$

Legenda:

R_c - Resistência à compressão, em MPa;

F_c - Carga máxima, em N;

2500- área dos pratos ou das placas auxiliares (50 mm x 50 mm), em mm².

3.2.6. Ensaio de absorção de água por capilaridade

Este ensaio foi realizado com base na norma EN1015-18:2002. Os materiais utilizados neste ensaio foram: um recipiente de profundidade mínima de 20 mm e de área plana suficientemente grande para manter os provetes imersos mantendo sempre um nível de água constante, como é possível observar na Figura 40, um cronómetro graduado em segundos, uma balança como instrumento de pesagem, Figura 39, uma estufa de forma a poder secar os provetes antes de serem ensaios com uma temperatura de $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$, papéis de filtro absorventes com uma massa específica de $200\text{ g/m}^2 \pm 20\text{ g/m}^2$ e absorção de água capacidade de $160\text{ g/m}^2 \pm 20\text{ g/m}^2$ e, por fim, água desmineralizada ou destilada.



Figura 39 - Balança utilizada durante o ensaio



Figura 40 - Recipiente utilizado

Este ensaio, numa fase inicial e de forma a conseguir obter todos os provetes utilizados completamente secos, obrigou a colocar previamente os provetes numa estufa a $60^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ durante 24 H. Seguidamente, estes mesmo provetes foram pesados de forma a conseguir obter as suas massas completamente secas. Em seguida, os provetes foram colocados no recipiente com a face quebrada dos prismas para baixo, estando estes apoiados na base do recipiente. Posteriormente, foi colocada água a uma profundidade de 5mm a 10mm durante todo o teste. O nível de água foi mantido constante durante todo o teste e o recipiente foi coberto de forma a evitar a evaporação de água do sistema. Figura 41.

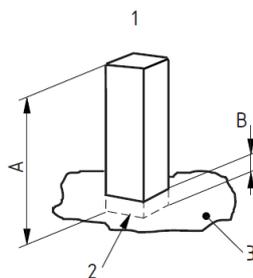


Figura 41 - Imagem retirada da norma BS EN1015-18:2002 de como colocar os provetes

Legenda:

1 - Amostra do provete;

2 - Faces finais quebradas do provete;

3 – Superfície de água;

A – Aproximadamente 80 mm;

B – Imersão de 5 a 10 mm se a superfície for de textura pesada.

Seguidamente, retiraram-se as amostras do tabuleiro, após 10 min, foram limpas rapidamente, retirando a água superficial, e foram pesadas (M1). Os provetes voltaram a ser colocados, o mais rápido possível, no recipiente. O procedimento foi repetido de 10 em 10 min. até atingir os 90 min (M2) e o período de medição foi alargado até se atingir a estabilização do processo da absorção de água por capilaridade.

O coeficiente de absorção de água corresponde ao declive da linha reta que liga os pontos representativos das medições efetuadas aos 10 min e 90 min. Este coeficiente é obtido a partir da seguinte equação (3):

$$C = 0,1(M2 - M1)kg/(m^2 \cdot min^{0,5}) \quad (3)$$

A profundidade de penetração de água é determinada em mm. Os valores individuais do coeficiente de absorção de água C foram calculados com a seguinte precisão: o mais próximo de $0,05kg/(m^2 \cdot min^{0,5})$ ou $0,05kg/m^2$. Calculou-se o valor médio do coeficiente de absorção de água (Cm) a partir de valores individuais para $0,05kg/(m^2 \cdot min^{0,5})$ ou $0,1kg/(m^2 \cdot min^{0,5})$, conforme o caso.

3.2.7. Ensaio de absorção de água por imersão

Este ensaio foi realizado tendo em conta a especificação LNEC E394. Para a realização deste ensaio foram utilizados os seguintes materiais: uma estufa ventilada regulada para uma temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e uma balança que permita efetuar pesagens da massa dos provetes, tanto ao ar como imersos em água

Inicialmente, colocou-se um provete num recipiente com água até obter uma massa constante, mantendo o nível de água do recipiente superior a 20mm da face superior do provete imerso.

Considerou-se que foi obtida uma massa constante do provete saturado, quando a diferença das pesagens intervaladas de pelo menos 24 H foi inferior a 0,1% da média das duas leituras.

Antes de realizar qualquer pesagem, a superfície do provete foi seca com um pano absorvente húmido, mas espremido, de modo a remover a água superficial. Em seguida, após obter a massa constante, o provete foi pesado dentro da água.

Posteriormente, retirou-se o provete dentro de água e realizou-se a sua secagem, até massa constante, numa estufa ventilada à temperatura de $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$. Só se considerou a massa do provete seco constante quando a diferença entre massas obtidas em duas pesagens consecutivas, intervaladas de 24 horas, foi inferior a 0,1% da média das duas leituras.

Para calcular a absorção de água por imersão, utilizou-se a seguinte equação (4):

$$Ai = \frac{m1-m3}{m1-m2} \times 100 \quad (4)$$

Legenda:

- m1 – massa do provete saturado no ar, em gramas;
- m2 – massa hidrostática do provete saturado, em gramas;
- m3 – massa do provete seco, em gramas.

3.2.7. Ensaio de resistência à flexão

Este ensaio realizou-se tendo em conta o descrito na norma NPEN 19-1 2006, tendo como objetivo a determinação da resistência dos provetes à flexão através de um método de carga concentrada a meio vão e por intermédio do equipamento que pode ser visualizado na Figura 42.

De forma ao ensaio ser o mais criterioso possível, a prensa permite a aplicação de cargas até 10 kN com uma exatidão de $\pm 1,0 \%$ de carga registada nos 4/5 superiores da escala de medida e com uma velocidade de (50 ± 10) N/s. Esta também possui um dispositivo de flexão com dois cilindros de apoio em aço de $(10,0 \pm 0,5)$ mm de diâmetro, distando um do outro $(100,0 \pm 0,5)$ mm e um terceiro cilindro, de carga, em aço do mesmo diâmetro equidistantes dos dois primeiros, tendo um comprimento compreendido entre 45 mm e 50 mm.

Na realização do ensaio colocou-se os provetes na prensa com a face de moldagem voltada para o utilizador da máquina, ficando as faces que estiveram em contacto com o molde no local onde foi aplicada a carga à velocidade de (50 ± 10) N/s até à amostra entrar em rotura, como é visível nas Figuras 43 e 44.



Figura 44 - Máquina Lloyd equipada para a realização de ensaios à flexão

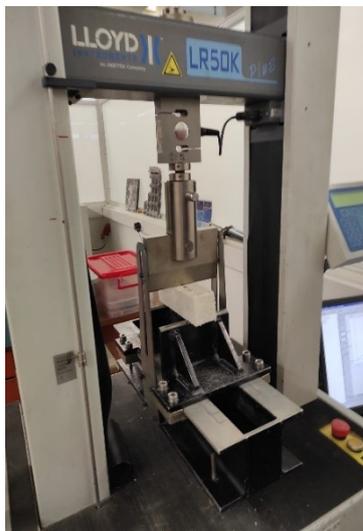


Figura 42 - Antes de ser ensaiado



Figura 43 - Depois de ser ensaiado

Após os provetes terem sido ensaiados obtiveram-se meios-prismas (Figura 45) que foram conservados com um pano húmido para posteriormente serem ensaiados à compressão.



Figura 45 - Provetes após ensaio à flexão

Para o cálculo da resistência à flexão R_f , em Mega Pascal recorreu-se à seguinte equação (5):

$$R_f = \frac{1,5 \times F_f \times l}{b^3} \quad (5)$$

Legenda:

- R_f – Resistência à flexão, em MPa;
- b – Lado da seção quadrada do prisma, em mm;
- F_f – Carga aplicada ao centro do prisma na rotura, em N;
- l – Distancia entre os apoios, em mm.

3.2.8. Ensaio Térmico

Este ensaio foi realizado tendo em conta um procedimento interno do LMC, elaborado com base na norma ISSO-9869-1994.

O *Prototherm* (protótipo utilizado para a caracterização das propriedades térmicas – ver Figura 46) forma um canal fechado com placas isolantes de maneira que sejam minimizadas as perdas de calor, coladas e aplicadas com espuma expansiva e parafusos. O canal possui uma secção trapezoidal em planta (Figura 46 b) e uma seção retangular ao longo da direção longitudinal (Figura 46 a) com área inferior de 18750 mm² ao longo de 600 mm (Gomes et al., 2021).

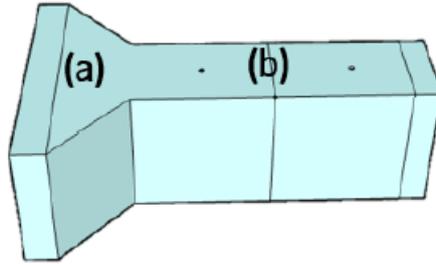


Figura 46 - a) Secção trapezoidal, (b) Secção retangular (Catarina et al., 2021)

Na zona trapezoidal (a) está uma fonte de calor e um dissipador, perto do começo da secção retangular, de forma ao calor propagar-se ao longo da mesma. Com o intuito de ser possível o controlo da temperatura foi instalado um regulador de temperatura, no qual se fixou uma temperatura constante de $40^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$ (Figura 47).

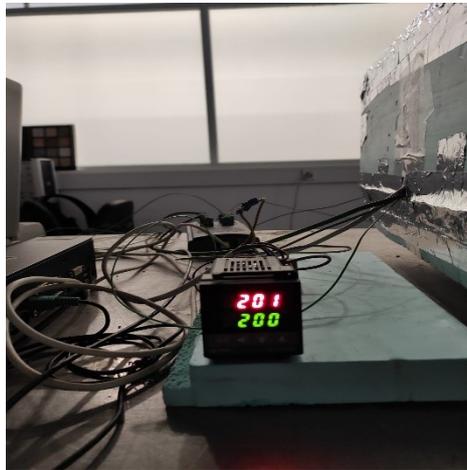


Figura 47 - Regulador de temperatura

A secção retangular é dividida em 2 secções de 300 mm de comprimento cada, de maneira a facilitar a colocação das placas para ensaios (Figura 48). O interior das placas possui uma dimensão de $150 \times 150 \times 50 \text{ mm}^3$.



Figura 48 - Placa com o molde colocado

Foram feitas aberturas na parte superior da seção retangular para que pudessem ser inseridos três termopares do tipo k, em que o sensor 1 regista a temperatura *input*, o sensor 2 a temperatura *output* e o sensor 3 a temperatura ambiente (Figura 49).



Figura 49 - Prototherm (1-Temperatura ambiente / 2-Temperatura output / 3-Temperatura input)

Para obter as temperaturas dos termopares, foi utilizado um *Picolog*, que regista as temperaturas em função do tempo.

De forma a ser possível obter o fluxo de calor, foi colocado um fluxímetro. A sua colocação foi realizada através de colagem aos provetes com pasta dentífrica na área de contacto no centro das placas.

Para concluir o ensaio foi colocada à volta do provete uma espuma expansiva de forma a mitigar perdas de calor durante o mesmo. Após a sua secagem o *Prototherm* foi fechado com fita de alumínio garantindo uma boa estanqueidade.

Os dados deste ensaio foram obtidos pelo *Picolog*. Cada ensaio teve uma duração de 24 horas, garantindo a estabilização do fluxo de calor e só após essa verificação, se deve considerar um intervalo de tempo de 1 hora e 30 min. para cada ensaio, calculando assim o fluxo de calor que atravessa o provete em W/m^2 . É importante referir que a correção associada ao fluxímetro foi de $61\mu V/W/m^2$.

Na determinação dos coeficientes térmicos, foi necessário fazer a média das temperaturas entre o sensor 1 (*input*) e o sensor 2 (*output*) em graus, no intervalo de 1 hora 30 min. onde existe estabilização do fluxo de calor. Para o cálculo desse parâmetro aplicou-se a seguinte equação (6):

$$U = \frac{Q}{\Delta T} \quad (6)$$

Legenda:

U – Coeficiente de transmissão térmica, em W/m². °C;

Q – Fluxo de calor, em W/ m²;

ΔT – Diferença de temperatura, em °C.

Na condutividade térmica, aplicou-se a seguinte equação (7):

$$U = \frac{1}{R_{si} + \sum R_t + R_{se}} \quad (7)$$

Legenda:

U – Coeficiente de transmissão térmica, em W/m². °C;

R_t – Resistência térmica, em m². °C/W;

R_{si} – Resistência térmica superficial inferior, em m². °C/W.

No cálculo da resistência térmica, utilizou-se a equação (8):

$$R_t = \frac{e}{\lambda} \quad (8)$$

Legenda:

R_t – Resistência térmica em m². °C/W;

e – Espessura do material, em metros (m);

λ – Condutividade térmica em W/m. °C.

Para saber se os materiais concebidos podiam ser considerados isolantes térmicos, estes teriam de cumprir os seguintes requisitos de acordo com a norma(ITE50-LNEC-1, 2006).

- Condutibilidade térmica inferior a $0,065 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ \text{C})$;
- Resistência térmica superior a $0,030 \text{ (m}^2 \cdot ^\circ \text{C)/W}$.

4. Resultados

Neste capítulo irão ser abordados todos os resultados obtidos na elaboração deste trabalho experimental, bem como as considerações feitas no mesmo.

4.1. Teor de Humidade

Relativamente ao teor de humidade, executou-se o processo de 2 formas diferentes. O procedimento inicial foi fundamental para avaliar qual a melhor preparação do papel, para uma posterior utilização como argamassa, pois este material é bastante absorvente, não permitindo a sua incorporação num estado completamente seco.

No processo em que foi utilizado o micro-ondas, em vez da filtragem de água por gravidade, os intervalos de tempo utilizados podem ser observados na Figura 50. Pode observar-se que à medida que o tempo vai aumentando o teor de humidade dos provetes também vai aumentando, tornando-se o resultado mais expectável pois os provetes ao serem aquecidos durante um período maior, faz com que lhes seja retirada mais água. É também visível que, o comportamento dos dois papéis não se manteve constante durante o ensaio pois o papel *kraft* nos 3 primeiros tempos (1 minuto, 5 minutos e 10 minutos) apresentou sempre valores superiores em relação ao papel de impressão, levando à conclusão de que o papel *kraft* absorve muito mais água que o papel de impressão numa fase inicial. Contudo, no último intervalo de tempo o mesmo não é verificado, tendo o papel de impressão registado um maior teor, levando a acreditar que o papel de impressão absorve mais água que o papel *kraft*, simplesmente precisa de mais tempo para que a mesma quantidade de água possa ser absorvida. Tendo em conta que a temperatura do micro-ondas em todos os ensaios se manteve a mesma e ambos os papéis antes de serem lá colocados se encontravam completamente saturados, a única variável em estudo era o tempo de duração do micro-ondas.

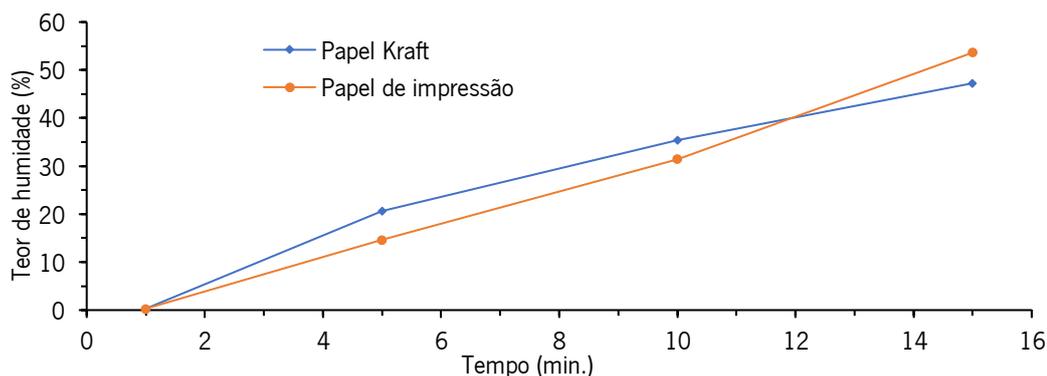


Figura 50 - Variação do teor de humidade em função do tempo com a utilização de um micro-ondas

No segundo procedimento, utilizando o método de filtragem gravítica e também o método de compressão manual, foram estudados os intervalos de tempo que podem ser observados na Figura 50.

Através da análise da Figura 51 é possível observar que, quando os provetes foram expostos a um processo de compressão manual, o papel *kraft* apresentava um valor maior no teor de humidade em relação ao papel de impressão, algo que não aconteceu no resto do ensaio. Isto é explicado pelo facto de ser um processo de trituração manual e que levou a que o papel *kraft* ficasse com uma dimensão superior à do papel de impressão. Este facto facilitou a sua compressão, permitindo que fosse logo espremida mais água, enquanto o papel de impressão se apresentava numa pasta mais fina, dificultando a saída de água do conjunto. Nos restantes períodos podemos observar que o papel de impressão apresentou sempre melhores resultados no teor de humidade. É importante referir que ambos os papéis, nos primeiros períodos, sofreram uma grande perda de água e que nos intervalos seguintes isto já não aconteceu.

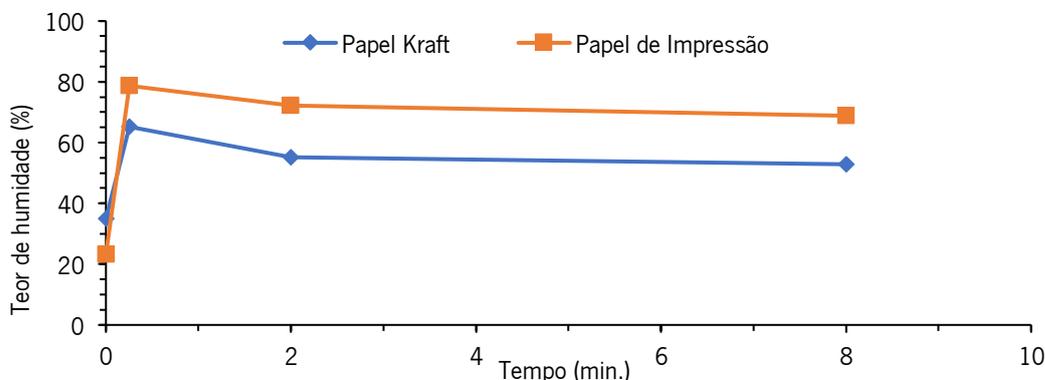


Figura 51 - Variação do teor de humidade em função do tempo com recurso a um processo de filtração do papel

Após a análise dos resultados obtidos em ambos os processos, concluiu-se que o processo mais viável para a continuação deste procedimento experimental seria a utilização do método que segue a norma do teor de água, que, apesar de ser mais trabalhoso, permitiu obter resultados mais coerentes sobre o comportamento do teor de humidade do papel. De forma a variar os intervalos onde esta variabilidade se apresenta maior, foi escolhido o processo manual, de 15 minutos e 2 horas, pois o processo de 8 horas iria tornar-se demasiado demorado e este não apresenta diferenças significativas relativamente ao processo de 2 horas.

4.2. Quantidades dos materiais utilizados nas misturas

Esta etapa foi dividida em dois processos. Primeiramente, foi apenas trabalhado o papel *kraft*, de forma a poder fazer variar as quantidades de cimento em volume, o método da cura do *papercrete* e o tempo de secagem do mesmo, tendo em conta o seu teor de humidade. Posteriormente, foi realizado um ensaio à compressão desses provetes conseguindo seleccionar quais as misturas que apresentaram melhores resultados. Estas misturas foram adotadas como referência, tanto na utilização do papel de impressão, como para uma posterior mistura com areia e, assim, formar uma argamassa.

Como pode ser observado na Tabela 8, estas são as misturas ótimas obtidas para cada tempo de filtração seleccionado no capítulo anterior (Manual, 15 Min e 2H), e para cada variação diferente da quantidade de cimento. É possível observar que, quanto maior o tempo de filtragem da água do papel, maior será a percentagem de água utilizada de forma que a argamassa possa obter a trabalhabilidade pretendida no espalhamento. No processo manual, este fenómeno não foi tão perceptível, uma vez que foi realizado pela força humana, tornou-se impossível calcular e replicar todas as vezes que foi utilizada a mesma amostra. A quantidade de cimento calculava-se através da percentagem de volume de cimento pretendido a multiplicar pelo volume de papel utilizado. Este processo foi um pouco exaustivo e trabalhoso pois, dada a variação de tantos fatores numa mesma mistura, dificultou a definição de uma regra de utilização, levando a que a sua realização fosse feita por tentativa erro, até conseguir acertar no espalhamento próximo de 14 cm.

Foram realizados 12 provetes de 50x50x50 mm³ de cada amostra de forma a poder variar o tipo de cura do *papercrete*. Num processo, três foram colocados ao ar livre com película aderente

e no outro, três ao ar livre sem a película aderente. Os outros dois processos foram semelhantes, mas em vez de ficarem ao ar livre, foram colocados numa estufa a 40° C.

Após a realização dos ensaios de compressão, cujos resultados podem ser visualizados no subcapítulo seguinte, chegou-se à conclusão de que a melhor percentagem de cimento era a de 70 %, que se deveria deixar a escoar o papel por 2H e que o melhor método de cura do *papercrete* foi com película e ao ar livre.

Assim, foi possível iniciar a segunda etapa, do fabrico das argamassas. Esta etapa teve como objetivo realizar uma argamassa de papel de impressão com as mesmas condições que a argamassa ótima de papel *kraft*. A argamassa de papel de impressão, que respeitava o espalhamento pretendido, pode ser observada na Tabela 8. Com este papel, em relação ao papel *kraft* e de forma a apresentar uma trabalhabilidade semelhante, não foi necessária a adição de tanta água, uma propriedade que também já tinha sido realçada no estudo do teor de humidade dos dois diferentes tipos de papéis.

Posteriormente, e de forma a conseguir ver a influência do uso do papel completamente saturado, realizou-se uma mistura complementar, em que o papel antes de ser utilizado se encontrava completamente seco (Tabela 8). Em relação às misturas anteriores, como já seria espectável, para o material que se encontrava totalmente seco, foi necessária a adição de mais água em relação às misturas anteriores.

Em seguida, para conseguir estudar a influência da areia nos provetes ótimos, em todas as misturas foram adotados traços volumétricos de 1:1, 1:2 e 1:4, juntando mais água se necessário. As misturas ótimas foram obtidas ao longo deste estudo por um processo de tentativa erro, até chegar ao espalhamento pretendido (Tabela 8). É possível observar que, em ambos os papéis, quanto maior foi a quantidade de areia adicionada, mais água foi necessário adicionar ao longo da mistura. Ao contrário do que acontecia anteriormente à adição de areia, foi necessária uma maior quantidade de água para as misturas de papel de impressão do que para as misturas com o papel *kraft* (Tabela 8). Como na mistura do papel, o papel de impressão não possuía tanta água, levou a que na mistura de areia, essa água fosse necessária para dar a trabalhabilidade desejada ao material.

Na Tabela 8 encontram-se especificadas as quantidades de todos os materiais utilizados nos provetes deste trabalho experimental, para posteriormente serem ensaiadas possibilitando o estudo das suas propriedades mecânicas (compressão e flexão), térmicas e de absorção de água (capilaridade e imersão)

Tabela 8 - Quadro de todas as composições em volume utilizadas neste trabalho experimental

Composição	Número	Cimento (dm^3)	Areia (dm^3)	Papel (dm^3)	Água (dm^3)	Espalhamento (cm)	Cimento (%)	Água/Cimento
PK_Manual	1	1,40	0,00	2,00	1,40	14,00	70,00	1,00
	2	1,00	0,00	2,00	1,10	14,00	50,00	1,10
	3	0,60	0,00	2,00	1,10	14,00	30,00	1,84
	4	0,20	0,00	2,00	1,10	14,00	10,00	5,50
Pk_15Min	1	1,40	0,00	2,00	1,75	14,00	70,00	1,25
	2	1,00	0,00	2,00	1,50	14,00	50,00	1,50
	3	0,60	0,00	2,00	1,25	14,00	30,00	2,08
	4	0,20	0,00	2,00	1,25	14,00	10,00	6,25
Pk_2H	1	1,40	0,00	2,00	1,70	14,00	70,00	1,21
	2	1,00	0,00	2,00	1,70	14,00	50,00	1,70
	3	0,60	0,00	2,00	1,80	14,00	30,00	3,00
	4	0,20	0,00	2,00	1,80	14,00	10,00	9,00
	5	1,40	1,00	2,00	0,08	14,00	70,00	0,06
	6	1,40	2,00	2,00	0,29	14,00	70,00	0,21
	7	1,40	4,00	2,00	0,32	14,00	70,00	0,23
Pk_Seco	1	1,40	0,00	2,00	1,70	14,00	70,00	1,21
PI_2H	1	1,40	0,00	2,00	0,07	14,00	70,00	0,05
	2	1,40	1,00	2,00	0,17	14,00	70,00	0,12
	3	1,40	2,00	2,00	0,43	14,00	70,00	0,31
	4	1,40	4,00	2,00	0,45	14,00	70,00	0,32

4.3. Compressão

Este subcapítulo está dividido em duas etapas tal como o anterior. A primeira fase deste complementa a segunda fase do anterior e justifica a utilização das misturas realizadas na fase anterior.

Inicialmente, ensaiou-se à compressão os cubos que não possuíam areia na sua matriz, de forma a conseguir escolher qual a mistura que iria possuir melhores resultados para poder prosseguir este estudo. Nesta etapa, como é possível constatar através da análise da Figura 52 os provetes de *papercrete* que não apresentaram areia na sua conceção, não apresentaram um comportamento comum entre as argamassas normais quando ensaiados à compressão. Normalmente, as argamassas cimentícias convencionais são dotadas de rotura frágil, com uma queda de resistência acentuada na fase pós-pico do diagrama de comportamento em compressão. Após atingir a resistência máxima, esta cai de forma abrupta, pois o provete entra em rotura. Contudo, nos provetes de *papercrete* tal fenómeno não acontece. Devido às fibras de papel, o provete não entra em rotura e a sua força máxima de compressão continua a aumentar de uma forma lenta com o passar do tempo, levando à sua estabilização, entrando em regime plástico, sendo este fenómeno designado de esmagamento. Por isso, de forma a ser o mais rigoroso possível na determinação tensão de compressão máxima em todos os provetes, foi traçada uma reta tangente aos primeiros deslocamentos até a tensão atingir quase o seu pico (Figura 51, reta 1) e, em seguida, quando o provete entra em esmagamento (Figura 51, reta 2) traçou-se outra tangente de forma a conseguir encontrar a tensão de compressão máxima que se encontrará na interseção dessas retas na zona da curva do gráfico da força de compressão *versus* o deslocamento (Figura 52, reta 3 e 4).

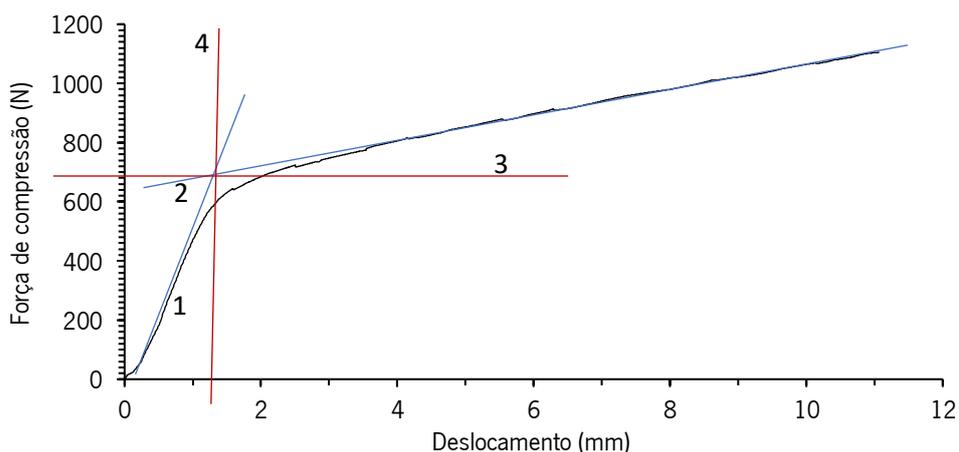


Figura 52 - Variação da força de compressão em função do deslocamento

É importante referir que, nos provetes que estiveram 90 dias cobertos com película aderente no seu processo de cura, esta teve de lhes ser retirada 2 dias antes de os provetes serem ensaiados, pois ainda se encontravam um pouco húmidos (figuras 53 e 54).



Figura 53 - Diferença entre os provetes com e sem película nos provetes de 70%



Figura 54 - Diferença entre os provetes com e sem película nos provetes de 50%

Em seguida, de forma a simplificar a apresentação dos resultados, optou-se por dividi-los em 3 tempos de filtragem: instantâneo (manual); 15 minutos e 2 horas. Nesse mesmo tempo de filtragem da água conseguiu-se analisar qual a diferença da utilização de diferentes percentagens de cimento na resistência à compressão dos provetes; a utilização, ou não, de película aderente no processo de cura das argamassas e analisar a necessidade, ou não, do recurso a uma estufa ventilada no processo de cura da argamassa. Com esta divisão do tempo de filtragem, conseguiu-se apresentar os resultados de uma forma global e conseguiu-se chegar à conclusão de qual o procedimento de mistura e cura que deveria ser adotada no resto do trabalho experimental.

No processo em que o tempo de coar foi instantâneo, o papel utilizado foi comprimido (espremido) manualmente. Através da análise da Figura 55 é possível constatar que, à medida que a percentagem de cimento vai aumentando, aumentam também as resistências à compressão, apresentando valores mais satisfatórios. É possível observar que em todos os provetes com película aderente, a sua resistência à compressão foi sempre superior. O recurso a uma estufa no processo de cura destas argamassas também levou a que estes provetes apresentassem maiores valores de resistência à compressão. Contudo, a diferença não foi significativamente maior que a associada ao recurso da película aderente.

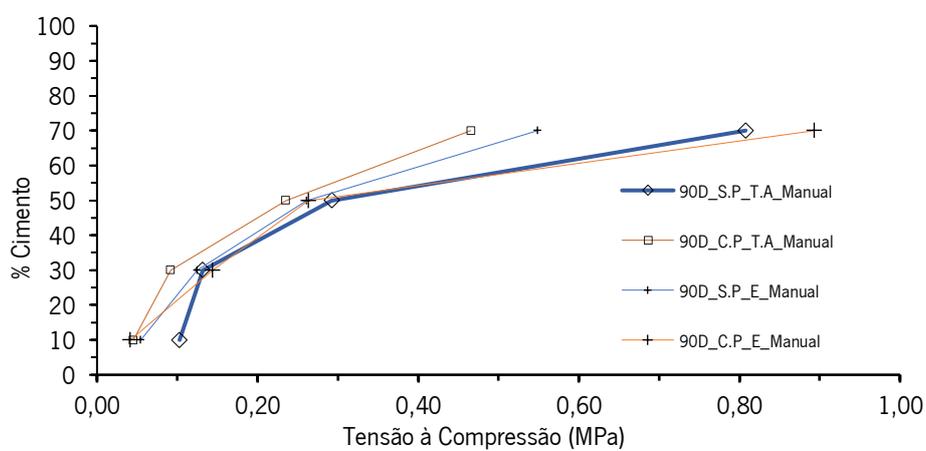


Figura 55 - Diferença entre os provetes com e sem película nos provetes de 50%

Em seguida, é possível observar o comportamento dos provetes em que o papel utilizado na sua conceção esteve sujeito a um processo de filtragem de 15 minutos. Analisando a Figura 56, verifica-se que sempre que a percentagem de cimento aumenta, a resistência à compressão também aumenta. A utilização de película aderente não foi tão relevante como no processo de filtragem instantânea, mas, ainda assim, provocou um aumento na resistência à compressão nos provetes, apesar de este não ser significativo. Para este tempo de filtragem, observa-se também que as resistências à compressão na percentagem de 70% de cimento têm valores muito semelhantes, destacando-se o 90D_C.P_E_15Min, seguindo-se do 90D_S.P_E_15Min. Em suma, neste grupo de ensaio, os provetes que mais se destacaram foram os colocados em estufa, apesar da pequena diferença relativamente aos curados à temperatura ambiente.

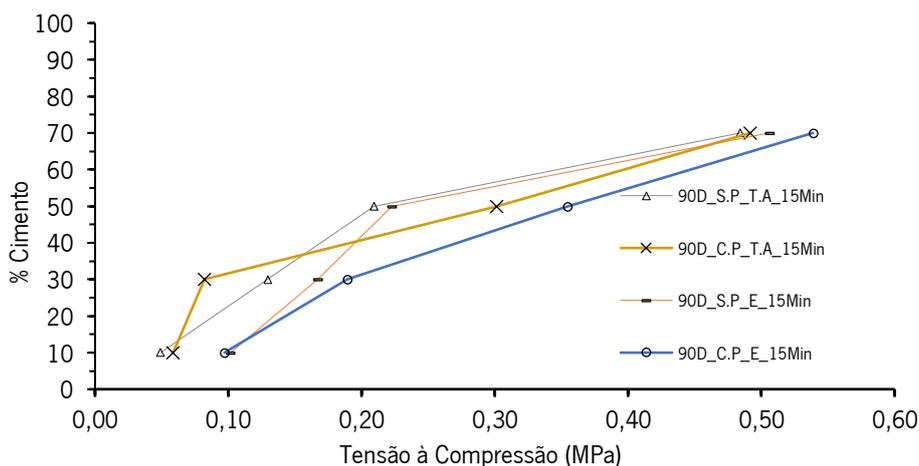


Figura 56 - Variação de porcentagem de cimento em função da tensão à compressão para os provetes sujeitos a um processo de filtração de 15 min

Por fim, serão apresentados os resultados obtidos num processo de filtragem da água de 2H. Analisando a Figura 57 observa-se que, tal como nos gráficos anteriores e conforme o esperado, o aumento da porcentagem de cimento leva a um aumento da tensão resistente à compressão de todos os provetes. É possível observar que, nas porcentagens mais baixas de cimento (10%, 30%), o provete que possui menores valores de resistência à compressão é o 90D_C.P_T.A_2H. Contudo, o seu comportamento com maiores dosagens de cimento (50% e 70%), já se aproxima dos restantes. O provete 90D_S.P_T.A_2H possui valores muito semelhantes aos provetes 90D_S.P_E_C.P_2H e 90D_E_C.P_2H, exceção feita quando a porcentagem de cimento é 50%, que se destaca como sendo o provete com menor tensão resistente à compressão. Por fim, conclui-se que para a porcentagem de 70% o provete que possuiu o melhor comportamento à compressão foi o 90D_C.P_T.A_2H.

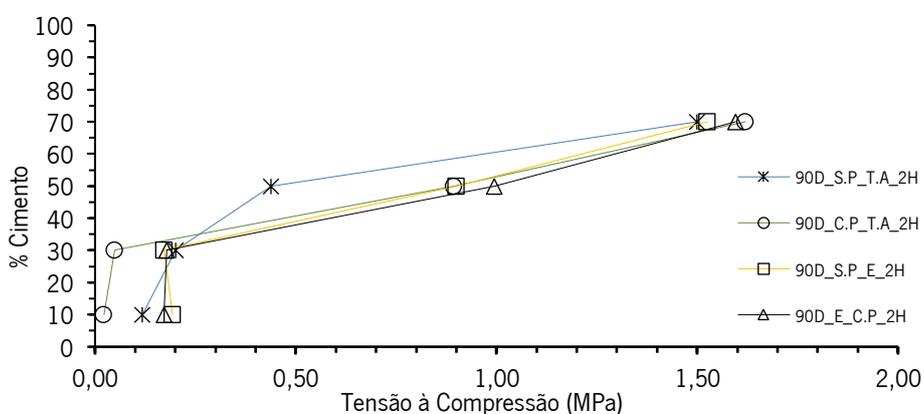


Figura 57 - Variação de porcentagem de cimento em função da tensão à compressão para os provetes sujeitos a um processo de filtração de 2H

Através de uma análise mais geral dos resultados obtidos neste procedimento experimental (Tabela 9), verifica-se que, em todos os provetes, o aumento da percentagem de cimento levou ao aumento da sua resistência à compressão. Assim, conclui-se que a melhor percentagem de cimento a utilizar é de 70%. O provete que mais se destacou foi o 90D_C.P_T.A_2H, sendo este utilizado como padrão para o restante trabalho laboratorial. Também é possível analisar a massa volúmica aparente representada pelo símbolo: ρ .

Tabela 9 - Resistência à compressão de todos os provetes realizados

Nome	Cimento (%)	Tensão (MPa)	Massa (g)	ρ (kg/m^3)
90D_S.P_T.A_Manual	70	0,811	79,98	640
	50	0,29	64,05	510
	30	0,13	51,16	410
	10	0,10	40,13	320
90D_C.P_T.A_Manual	70	0,47	88,63	710
	50	0,24	81,94	660
	30	0,09	49,49	400
	10	0,05	43,89	350
90D_S.P_T.A_15Min	70	0,48	64,82	520
	50	0,21	50,14	400
	30	0,13	28,14	230
	10	0,05	32,89	260
90D_C.P_T.A_15Min	70	0,49	76,73	610
	50	0,30	75,50	600
	30	0,08	67,59	540
	10	0,06	45,48	360
90D_S.P_T.A_2H	70	1,50	98,74	790
	50	0,44	63,45	510
	30	0,20	41,90	340
	10	0,12	36,86	290
90D_C.P_T.A_2H	70	1,62	111,50	890
	50	0,89	92,67	740
	30	0,05	57,87	460
	10	0,02	54,61	440
90D_S.P_E_Manual	70	0,55	62,36	500
	50	0,26	56,08	450
	30	0,12	46,48	370
	10	0,05	33,91	270
90D_C.P_E_Manual	70	0,89	60,77	490
	50	0,26	59,81	480
	30	0,14	45,12	360
	10	0,04	39,97	320

Tabela 10 - Resistência à compressão de todos os provetes realizados (continuação)

Nome	Cimento (%)	Tensão (MPa)	Massa (g)	ρ (kg/m^3)
90D_S.P_E_15Min	70	0,51	62,37	500
	50	0,22	54,59	440
	30	0,17	45,51	360
	10	0,10	35,45	280
90D_C.P_E_15Min	70	0,54	59,66	480
	50	0,35	56,72	450
	30	0,19	44,67	360
	10	0,10	34,38	280
90D_S.P_E_2H	70	1,53	85,30	680
	50	0,90	75,36	600
	30	0,17	38,57	310
	10	0,19	26,63	210
90D_C.P_E_2H	70	1,60	90,08	720
	50	0,99	71,51	570
	30	0,18	26,63	210
	10	0,17	27,51	220

Depois de adotada a mistura de referência, para prosseguir o trabalho experimental, assumiu-se como novas variáveis de estudo, as seguintes: a mesma combinação para o papel de impressão; o recurso a papel *kraft* completamente seco e a combinação com diferentes volumes de areia de ambos os papéis. Analisou-se qual a influência da areia, a troca do papel *kraft* pelo de impressão e a influência da saturação de 24H antes da realização do ensaio com a finalidade de observar a influência que a água teve nestes provetes. Para a apresentação dos resultados optou-se por dividi-los em 3 grupos.

Nos provetes que não possuem areia na sua constituição, é possível analisar através da Figura 58 que, de uma forma geral, o facto de estes serem ensaiados completamente saturados faz com que possuam uma redução significativa na sua tensão à compressão. Pode-se constatar que o provete PI_SAT.2H_70%CEM_SECO é o provete que mais se destaca dos restantes, apresentando o maior valor de tensão à compressão. O provete PI_SAT.2H_70%CEM_HUMIDO, possui a mesma constituição que o PI_SAT.2H_70%CEM_SECO, com a diferença de ter sido saturado e perdendo tensão à compressão, consegue ser superior aos restantes.

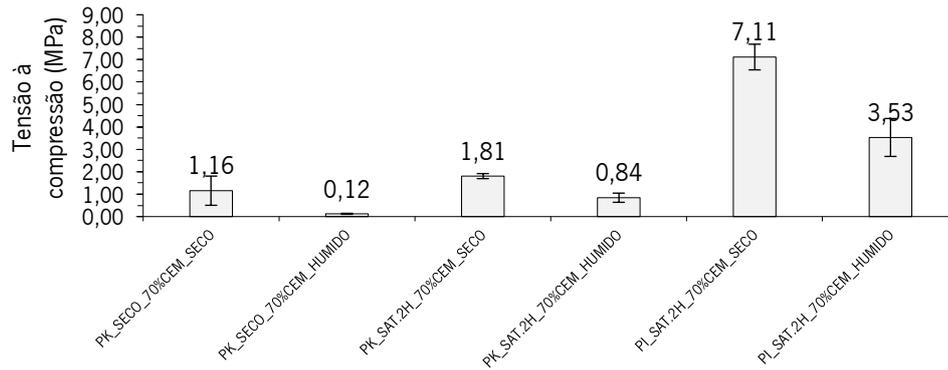


Figura 58 . Tensão à compressão para as amostras que não possuem areia na sua composição

O próximo grupo demonstra qual a influência da adição de diferentes volumes de areia nas misturas realizadas com papel de impressão. Pode-se observar (Figura 59) que o comportamento padrão se mantém, ou seja, que o facto de os provetes serem ensaiados após saturados durante 24 horas, lhes retira resistência à compressão. É visível que, quanto maior é a adição de areia nos provetes, menor é a sua tensão resistente à compressão. Os provetes que se destacaram foram PI_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_SECO, seguido de PI_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_HUMIDO. Também é importante realçar que, a presença de areia nestes provetes fez com que as diferenças de perda de tensão à compressão não fossem tão notórias como nas misturas anteriormente apresentadas.

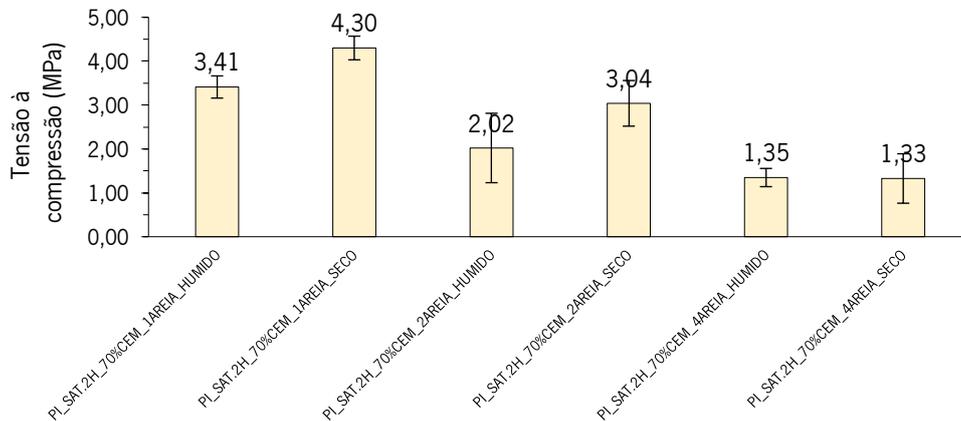


Figura 59 - Tensão à compressão para as amostras com areia e papel de impressão na sua génese

De seguida, os provetes abordados são os que possuem na sua constituição papel *kraft* com as diferentes variações do volume de areia (Figura 60). Como nos restantes grupos, a saturação dos provetes por 24H diminuiu-lhes a resistência à compressão. Observa-se, ainda, que a adição de areia nestes provetes não apresentou o mesmo comportamento anteriormente assinalado, pois o que possuiu maior tensão resistente à compressão foi o PK_SAT.2H_70%CEM_2AREIA_SECO. É importante referir que, nestes provetes, tal como nos anteriores, as diferenças entre serem ensaiados completamente saturados ou secos não foi muito significativa.

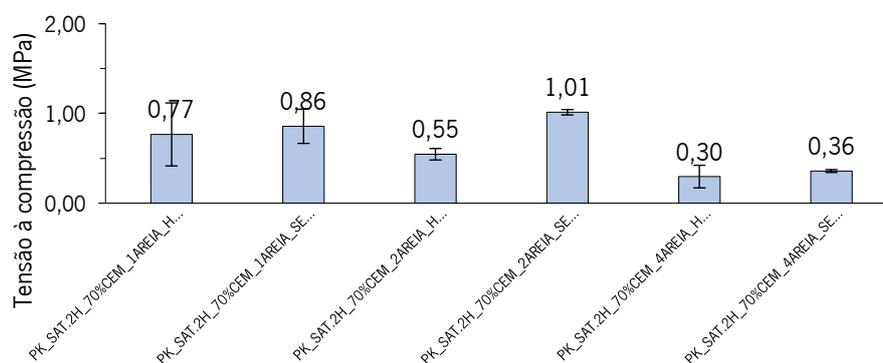


Figura 60 - Tensão à compressão para as amostras com areia e papel de *kraft* na sua génese

Por fim, é possível observar na Tabela 11 todas as misturas realizadas neste procedimento experimental. É importante destacar que a mistura que apresentou um melhor comportamento foi a do PI_SAT.2H_70%CEM_SECO, e a pior foi a do PK_SECO_70%CEM_HUMIDO. É observável na Figura 61, também, que, em todos os provetes, o facto de estes serem ensaiados saturados com 24 horas, ou não, influenciou de forma negativa a tensão de rotura à compressão. Numa comparação entre os diferentes tipos de papel, é observável que os provetes realizados com papel de impressão apresentaram melhores resultados que os mesmos realizados com papel *kraft*.

Tabela 11 - Tensão à compressão de todos os provetes realizados na segunda fase dos testes à compressão

Nome de mistura	Massa (g)	Força máxima de compressão (KN)	Tensão à compressão (MPa)	Desvio padrão (MPa)
PK_SECO_70%CEM_SECO	70,66	2,43	1,16	0,65
PK_SECO_70%CEM_HUMIDO	175,79	0,29	0,12	0,02
PK_SAT.2H_70%CEM_SECO	108,77	4,02	1,81	0,11
PK_SAT.2H_70%CEM_HUMIDO	172,52	2,00	0,84	0,21
PI_SAT.2H_70%CEM_SECO	156,48	16,17	7,11	0,57
PI_SAT.2H_70%CEM_HUMIDO	163,05	7,77	3,53	0,85
PI_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_HUMIDO	222,93	7,03	3,41	0,25
PI_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_SECO	259,46	10,67	4,30	0,27
PI_SAT.2H_70%CEM_2AREIA_HUMIDO	319,38	4,60	2,02	0,79
PI_SAT.2H_70%CEM_2AREIA_SECO	316,19	7,53	3,04	0,52
PI_SAT.2H_70%CEM_4AREIA_HUMIDO	304,13	3,13	1,35	0,21
PI_SAT.2H_70%CEM_4AREIA_SECO	242,66	3,22	1,33	0,56
PK_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_HUMIDO	224,09	1,57	0,77	0,35
PK_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_SECO	212,41	2,03	0,86	0,19
PK_SAT.2H_70%CEM_2AREIA_HUMIDO	253,06	1,33	0,55	0,06
PK_SAT.2H_70%CEM_2AREIA_SECO	254,77	2,47	1,01	0,03
PK_SAT.2H_70%CEM_4AREIA_HUMIDO	246,57	0,70	0,30	0,13
PK_SAT.2H_70%CEM_4AREIA_SECO	246,31	0,84	0,36	0,02

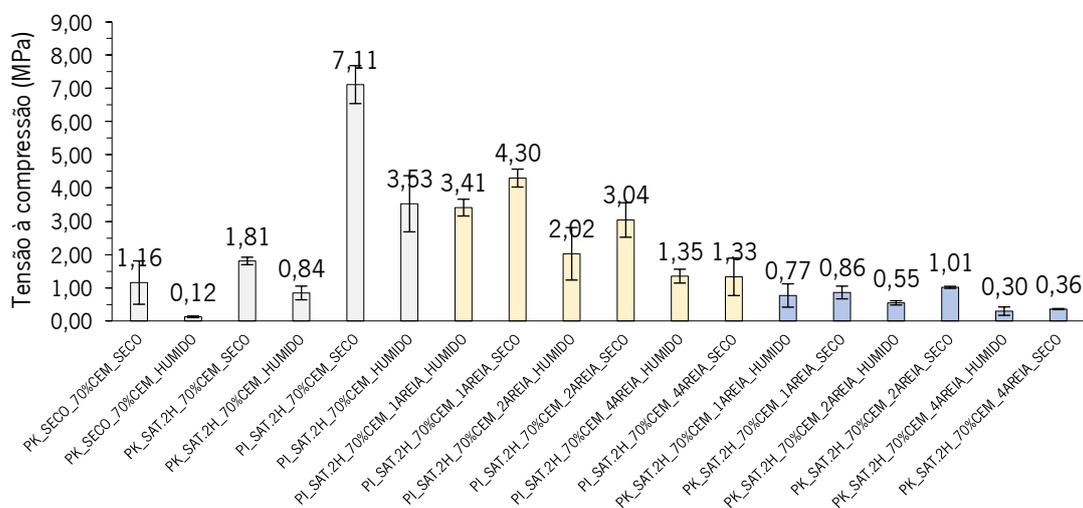


Figura 61 - Tensão à compressão de todos os provetes realizados

Comparando o melhor provete obtido e que foi o PI_SAT.2H_70%CEM_SECO, com uma tensão resistente à compressão de 7,11 MPa, com o ensaio destacado na tabela 1, que era a

mistura de 6:2:2 com uma tensão à compressão de 6,5 MPa, obteve-se um melhor valor deste parâmetro.

4.3. Flexão

Relativamente aos ensaios à flexão, estes, tal como os de compressão, foram divididos em 3 grupos. Por intermédio da realização destes ensaios foi possível observar quais os diferentes valores que a tensão de rotura à flexão pode assumir nos provetes face: ao uso de dois tipos de papéis diferentes, a junção de diferentes volumes de areia e qual a influência da realização deste ensaio em provetes saturados ao longo de 24 H, por imersão em água, antes de serem ensaiados.

Nos provetes que não possuem areia na sua constituição, é possível analisar através da Figura 62 que, de uma forma geral, o facto de estes serem ensaiados completamente saturados faz com que possuam uma redução significativa na sua tensão resistente à flexão. Pode-se constatar que o provete PI_SAT.2H_70%CEM_SECO foi o provete que mais se destacou dos restantes, apresentando o maior valor de resistência à flexão. Os provetes PI_SAT.2H_70%CEM_HUMIDO, tinham a mesma constituição que o PI_SAT.2H_70%CEM_SECO, com a diferença de terem sido saturados e, com isso, viram reduzida a tensão de rotura à flexão em 0,23 MPa no PK_SECO_70%_CEM_SECO para PK_SECO_70%_CEM_HUMIDO, de 0,50 MPa no PK_SAT2H_70%_CEM_SECO para PK_SAT.2H_70%_CEM_HUMIDO e 1,48 MPa PI_SAT2H_70%_CEM_SECO para PI_SAT2H_70%_CEM_SECO.

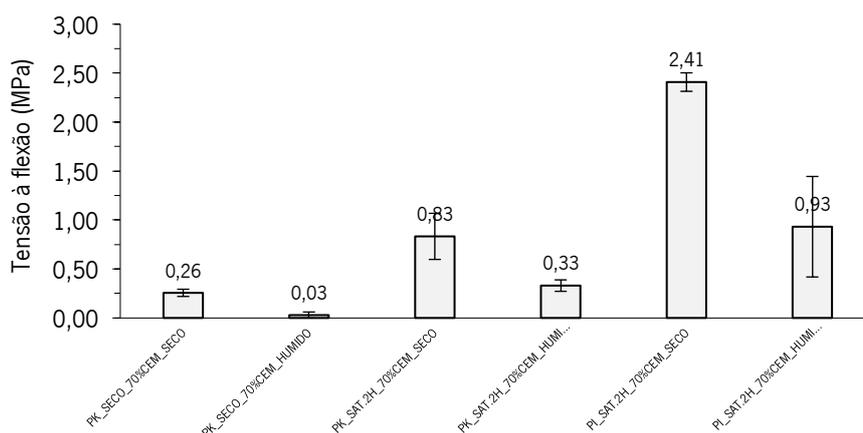


Figura 62 - Tensão à flexão para as amostras que não possuem areia na sua composição

O próximo grupo demonstra qual a influência da adição de diferentes volumes de areia nas misturas realizadas com papel de impressão. Pode-se observar (Figura 63) que o comportamento

padrão se mantém, ou seja, que o facto de os provetes serem ensaiados saturados, lhes reduz a tensão de rotura à flexão. É visível que, quanto maior é a adição de areia nos provetes, menor é a tensão resistente à flexão. Os provetes que se destacam são PI_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_SECO, seguido de PI_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_HUMIDO. Também é importante realçar que, a presença de areia nestes provetes fez com que as diferenças de perda de tensão à compressão não fossem tão notórias como nas misturas anteriormente apresentadas, pois essa diferença é de PI_SAT.2H_70%CEM_SECO para os provetes PI_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_SECO, PI_SAT.2H_70%CEM_2AREIA_SECO e PI_SAT.2H_70%CEM_4AREIA_SECO é de 1,22 MPa, 1,77MPa e 2,09MPa respetivamente. Enquanto para o provete PI_SAT.2H_70%CEM_HUMIDO para os PI_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_HUMIDO, PI_SAT.2H_70%CEM_2AREIA_HUMIDO e PI_SAT.2H_70%CEM_4AREIA_HUMIDO é de 0,25 MPa, 0,22 MPa e 0,57 MPa respetivamente.

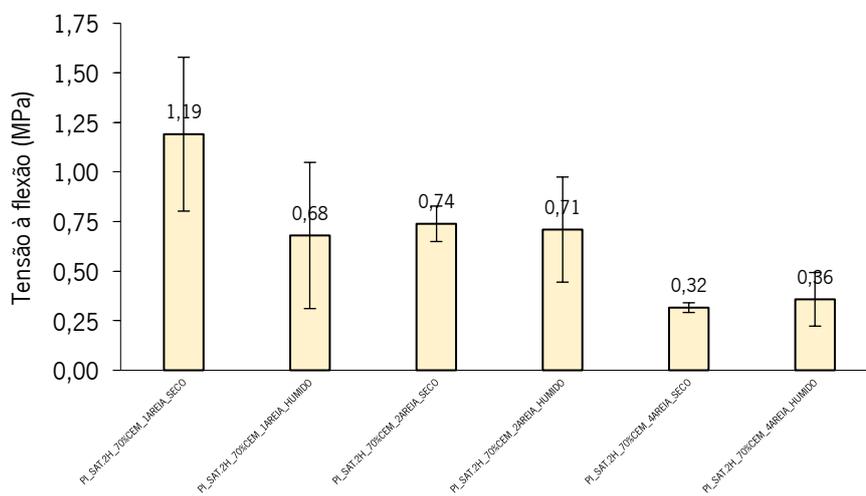


Figura 63 - Tensão à flexão para as amostras com areia e papel de impressão na sua génese

De seguida, os provetes abordados são os que possuem na sua constituição papel *kraft* e diferentes dosagens de areia (Figura 64). Como nos restantes grupos, a suturação dos provetes por 24H reduziu a resistência à flexão. Observa-se que a adição de areia nestes provetes não apresenta o mesmo comportamento anteriormente assinalado, pois o que possui maior tensão à flexão é o PK_SAT.2H_70%CEM_2AREIA_SECO.

É importante referir que, nestes provetes, tal como nos anteriores, as diferenças entre serem ensaiados completamente saturados ou secos não foi tão significativa, apresentando no provete PK_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_SECO uma resistência de 0,51 MPa relativamente ao mesmo provete sujeito a uma saturação de 24H antes de ser ensaiado

PK_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_HUMIDO, no PK_SAT.2H_70%CEM_2AREIA_SECO o mesmo se verifica com uma diferença de 0,03MPa. Contudo, no último provete essa diferença se dá no sentido inverso sendo o PK_SAT.2H_70%CEM_4AREIA_HUMIDO 0,03 MPa superior ao PK_SAT.2H_70%CEM_4AREIA_SECO.

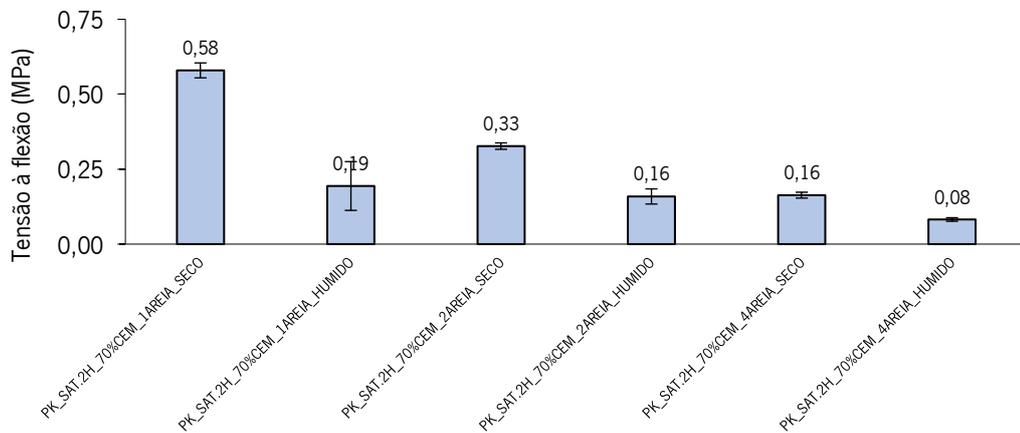


Figura 64 - Tensão à flexão para as amostras com areia e papel de *kraft* na sua génese

Por fim, é possível observar uma imagem geral de todas as misturas realizadas neste procedimento experimental (Tabela 12). É importante destacar que a mistura que apresentou um melhor comportamento foi a do PI_SAT.2H_70%CEM_SECO, e a pior foi a do PK_SECO_70%CEM_HUMIDO. É observável que no Figura 65, em todos os provetes, o facto de estes serem ensaiados saturados influencia de forma negativa a resistência à flexão. Numa comparação entre os diferentes tipos de papel, é observável que os provetes realizados com papel de impressão apresentam melhores resultados que os mesmos realizados com papel *kraft*.

Tabela 12 - Tensão à flexão de todos os provetes realizados

Misturas	Tensão à flexão (MPa)	Desvio padrão (MPa)
PK_SECO_70%CEM_SECO	0,26	0,04
PK_SECO_70%CEM_HUMIDO	0,03	0,03
PK_SAT.2H_70%CEM_SECO	0,83	0,24
PK_SAT.2H_70%CEM_HUMIDO	0,33	0,06
PI_SAT.2H_70%CEM_SECO	2,41	0,09
PI_SAT.2H_70%CEM_HUMIDO	0,93	0,51
PI_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_SECO	1,19	0,39
PI_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_HUMIDO	0,68	0,37
PI_SAT.2H_70%CEM_2AREIA_SECO	0,74	0,09
PI_SAT.2H_70%CEM_2AREIA_HUMIDO	0,71	0,26
PI_SAT.2H_70%CEM_4AREIA_SECO	0,32	0,02
PI_SAT.2H_70%CEM_4AREIA_HUMIDO	0,36	0,14
PK_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_SECO	0,58	0,02
PK_SAT.2H_70%CEM_1AREIA_HUMIDO	0,19	0,08
PK_SAT.2H_70%CEM_2AREIA_SECO	0,33	0,01
PK_SAT.2H_70%CEM_2AREIA_HUMIDO	0,16	0,03
PK_SAT.2H_70%CEM_4AREIA_SECO	0,16	0,01
PK_SAT.2H_70%CEM_4AREIA_HUMIDO	0,08	0,01

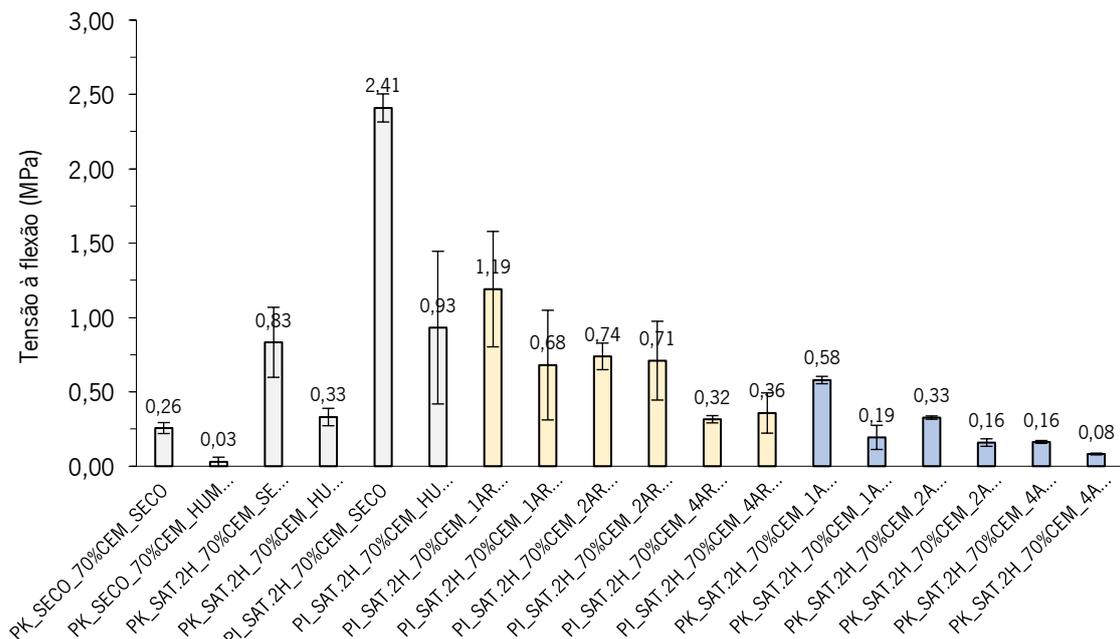


Figura 65 - Tensão à compressão de todos os provetes realizados

Comparando o melhor provete que se obteve neste ensaio laboratorial (PI_SAT.2H_70%CEM_SECO com 2,41 MPa) com o da Figura 3 (SCBWP 10% desperdício de papel com 28 dias de cura com 5,15 MPa) sendo o primeiro 2,74 MPa inferior ao último.

4.4. Ensaio de absorção de água por capilaridade

Neste ensaio iremos analisar quais os resultados obtidos pelos provetes quando sujeitos a um ensaio de imersão por capilaridade, que se entende como a entrada de água na rede porosa do betão devido a forças capilares resultante da diferença de pressão verificada entre a superfície do mesmo líquido presente nos poros e nos poros capilares. Este fenómeno verifica-se quando o betão se encontra sujeito a ciclos de moldagem, secagem e dependente do diâmetro dos poros capilares (Camões, 2002). De forma a fazer uma análise mais detalhada, estes provetes foram divididos em 3 grupos.

No primeiro grupo encontram-se os provetes que foram ensaiados, mas que na sua constituição não possuem areia. Como podemos constatar (Figura 66), existe uma composição que se destaca na absorção em relação aos restantes provetes, que neste caso se trata da PK_SECO_70%CEM possuindo um valor que é quase o dobro do da segunda série com o maior coeficiente. Em relação à Figura 67 podemos analisar que os provetes PK_SAT.2H_70%CEM e PI_SAT_70%CEM apresentam comportamentos um pouco semelhantes, enquanto o provete PK_SECO_70%CEM apresenta uma absorção muito rápida de água nos primeiros intervalos, tendo quase sempre o dobro do valor. Por fim, na Figura 68, apresentam-se os resultados com mais pormenor, apenas focando os primeiros 10 min até à 1H 30min e no qual podemos observamos que a relação anteriormente mencionada se mantém.

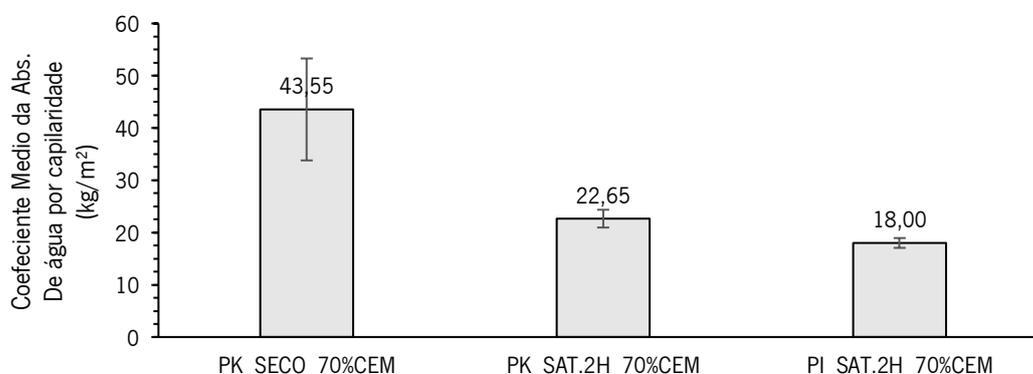


Figura 66 - Coeficiente médio de absorção de água por capilaridade para as amostras que não possuem areia na sua composição

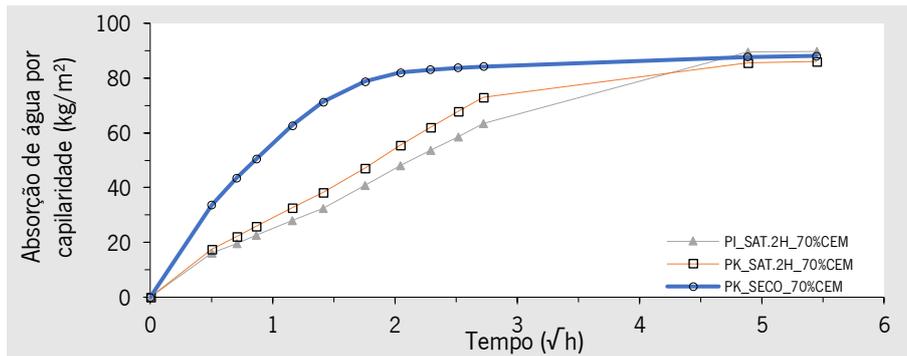


Figura 67 - Absorção de água por capilaridade para as amostras que não possuem areia na sua composição

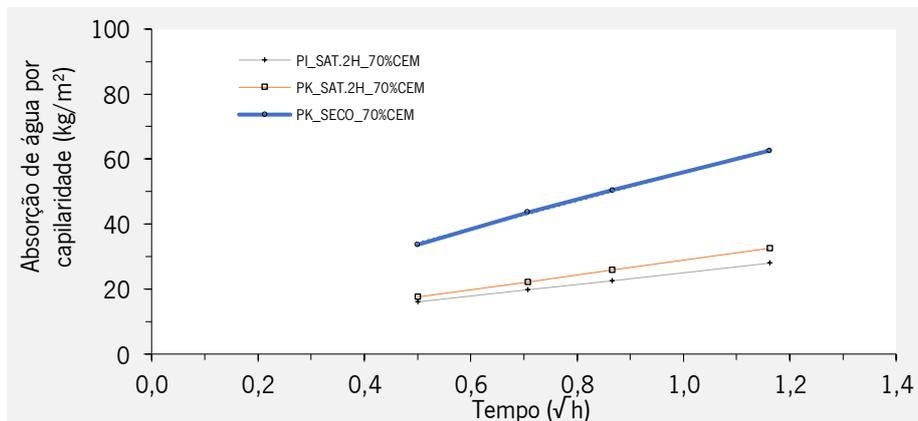


Figura 68 - Absorção de água por capilaridade para as amostras que não possuem areia na sua composição

O próximo grupo, apenas os resultados obtidos nos provetes constituídos por papel de impressão são considerados. Contudo, existe uma variação na quantidade de areia utilizada na sua conceção. Através da análise das Figuras 69 e 70 podemos observar que quanto mais areia é utilizada, maior é o coeficiente médio de absorção de água por capilaridade, por isso o provete que mais se destaca é o PI_SAT.2H_70%CEM_4AREIA. Relativamente à absorção de água por capilaridade por hora podemos observar que os provetes apresentam comportamentos semelhantes nos primeiros intervalos de tempo como se observa na Figura 71.

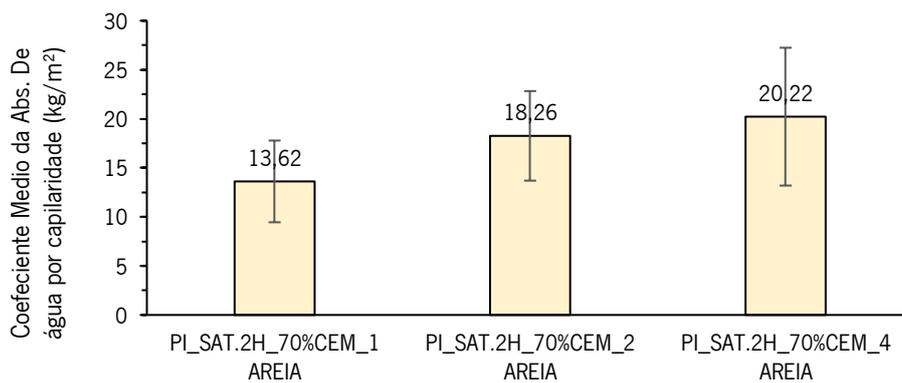


Figura 69 - Coeficiente médio de absorção de água por capilaridade para as amostras com areia e papel de impressão na sua gênese

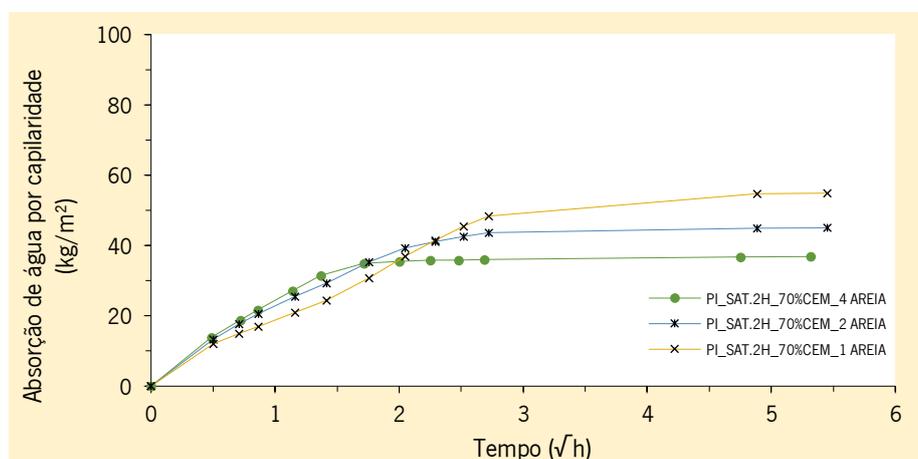


Figura 70 - Absorção de água por capilaridade para as amostras com areia e papel de impressão na sua gênese

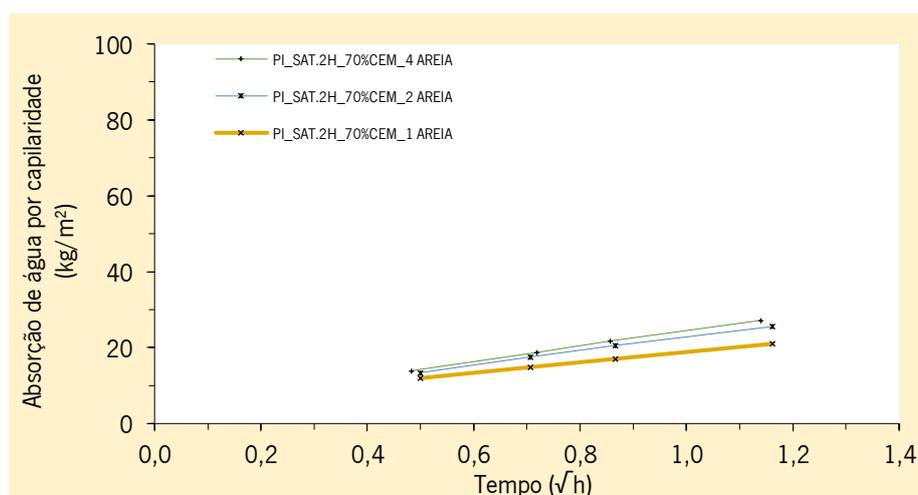


Figura 71 - Absorção de água por capilaridade nos intervalos de 15 a 90 minutos para as amostras com areia e papel de impressão na sua gênese

Em seguida, foram analisados os provetes com as mesmas variações de areia dos anteriores, contudo, a única diferença é que estes provetes foram concebidos com papel *kraft*. Através de análise das Figuras 72 e 73 podemos observar que o comportamento da variação de areia nos provetes não é semelhante ao anteriormente assinalado. A composição que apresenta um maior coeficiente médio de absorção de água por capilaridade é a PK_SAT2H_70%CEM_4AREIA, sendo que a segunda composição com maior coeficiente foi a PK_SAT.2H_70%CEM_1AREIA, fazendo com que não aconteça a mesma relação verificada com as composições anteriores. É possível observar (Figura 74) que a absorção de água por capilaridade em função do tempo nos 3 provetes é semelhante, sendo perceptível que os 2 provetes com maior capacidade de absorção por capilaridade possuem comportamentos muito semelhantes.

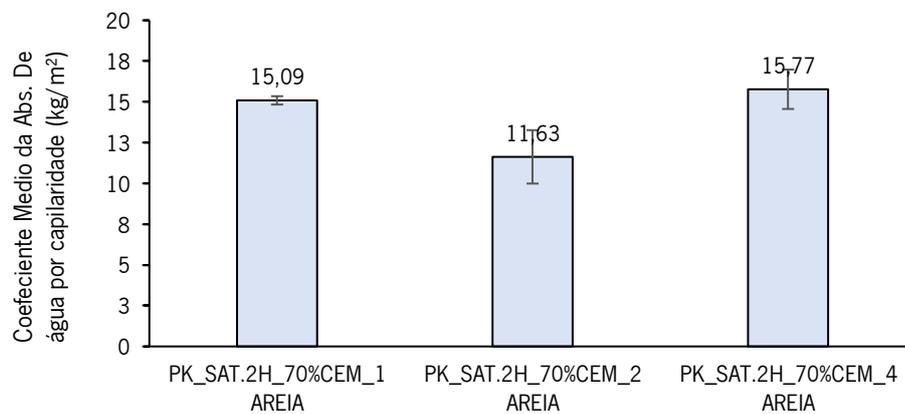


Figura 72 - Coeficiente médio de absorção de água por capilaridade para as amostras com areia e papel *kraft* na sua génese

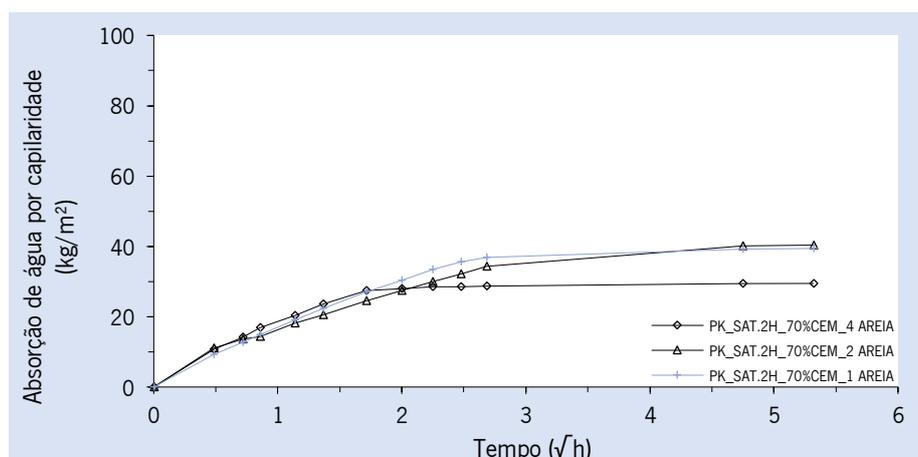


Figura 73 - Absorção de água por capilaridade para as amostras com areia e papel *kraft* na sua génese

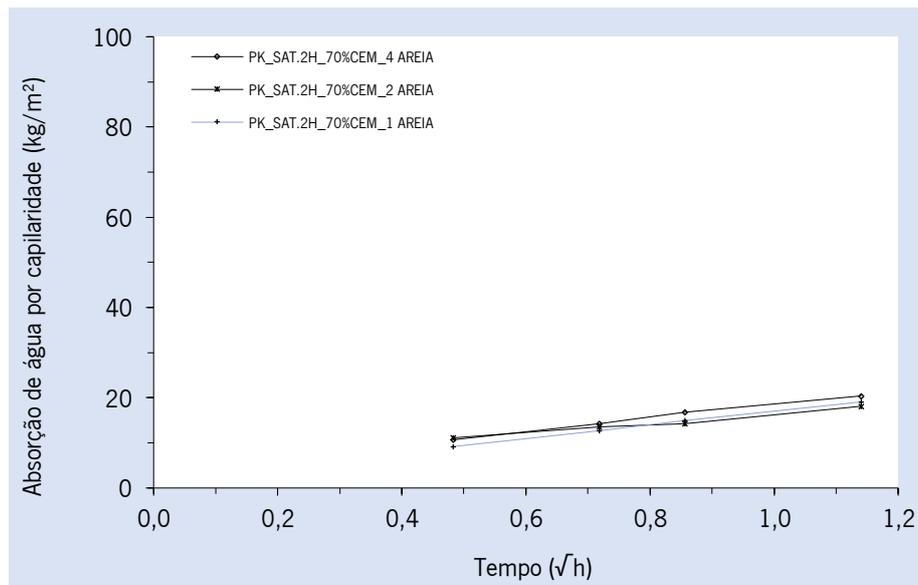


Figura 74 - Absorção de água por capilaridade nos intervalos de 15 a 90 minutos para as amostras com areia e papel *kraft* na sua gênese

Podemos observar o comportamento geral das misturas ensaiadas na Tabela 13 e nas Figuras 75, 76 e 77, sendo possível constatar que apenas uma composição de *papercrete* se destaca das restantes, possuindo um coeficiente médio de absorção de água por capilaridade sendo este o PK_SECO_70%CEM. Estes provetes apresentam uma absorção de água por capilaridade muito rápida nos primeiros intervalos de tempo, como é visível na Figura 78. É, também, possível observar que, quando não há areia ou está presente em pequena quantidade, as misturas que possuem papel de impressão possuem um menor coeficiente de absorção de água por capilaridade que os provetes que foram produzidos com papel *kraft*, sendo este comportamento inverso quando os provetes possuem uma maior quantidade de areia. De acordo com a norma utilizada, o coeficiente de absorção média de capilaridade deveria rondar os $0,05 \text{ kg/m}^2$, isso não se verifica em nenhum provete e como estes possuem uma rápida absorção irá afetar a durabilidade deste material, pois irá permitir uma rápida entrada de água com os agentes agressivos dissolvidos nela mesma (sulfatos, cloretos, reação álcalis-agregado e a ação dos ciclos do gelo-degelo) fazendo assim uma maior deterioração do mesmo.

Tabela 13 - Coeficiente médio de absorção de água por capilaridade de todos os provetes realizados

Mistura	Coeficiente médio da absorção de água por capilaridade (kg/m ²)	Desvio padrão (kg/m ²)	Coeficiente de variação (%)
PK_SECO_70%CEM	43,55	9,76	22,40%
PK_SAT.2H_70%CEM	22,65	1,70	7,51%
PI_SAT.2H_70%CEM	18,00	0,94	5,23%
PI_SAT.2H_70%CEM_1 AREIA	13,62	4,17	30,60%
PI_SAT.2H_70%CEM_2 AREIA	18,26	4,57	25,02%
PI_SAT.2H_70%CEM_4 AREIA	20,22	7,03	34,75%
PK_SAT.2H_70%CEM_1 AREIA	15,09	0,26	1,70%
PK_SAT.2H_70%CEM_2 AREIA	11,63	1,64	14,09%
PK_SAT.2H_70%CEM_4 AREIA	15,77	1,21	7,66%

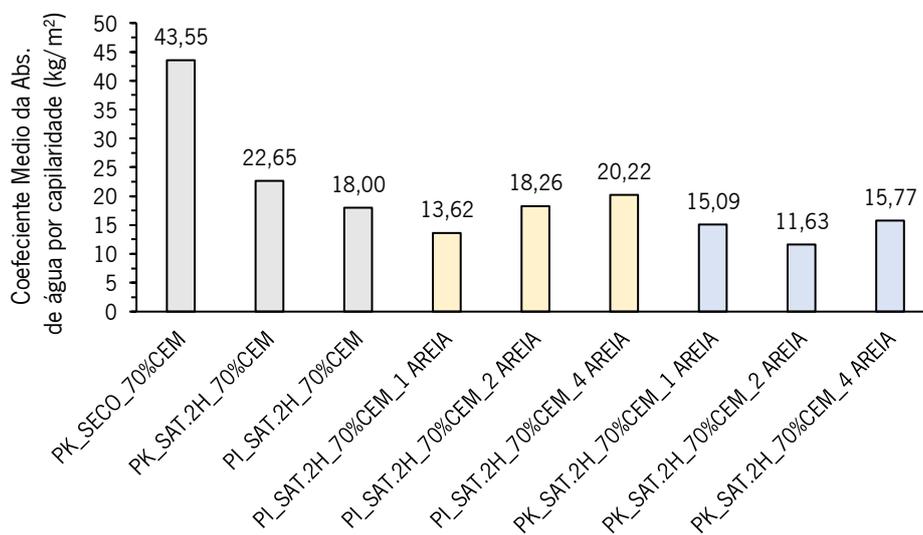


Figura 75 - Coeficiente médio de absorção de água por capilaridade de todos os provetes realizados

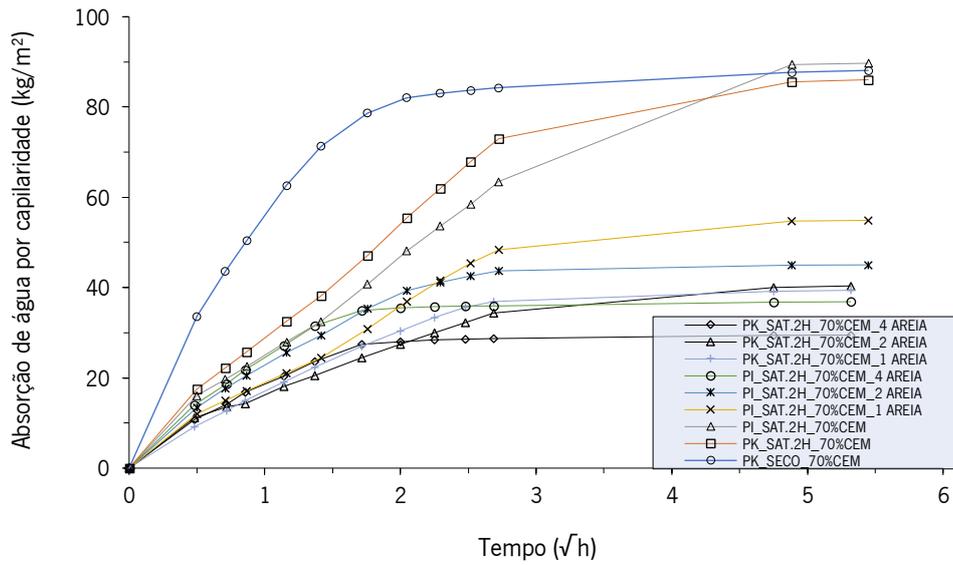


Figura 76 - Absorção de água por capilaridade de todos os provetes realizados

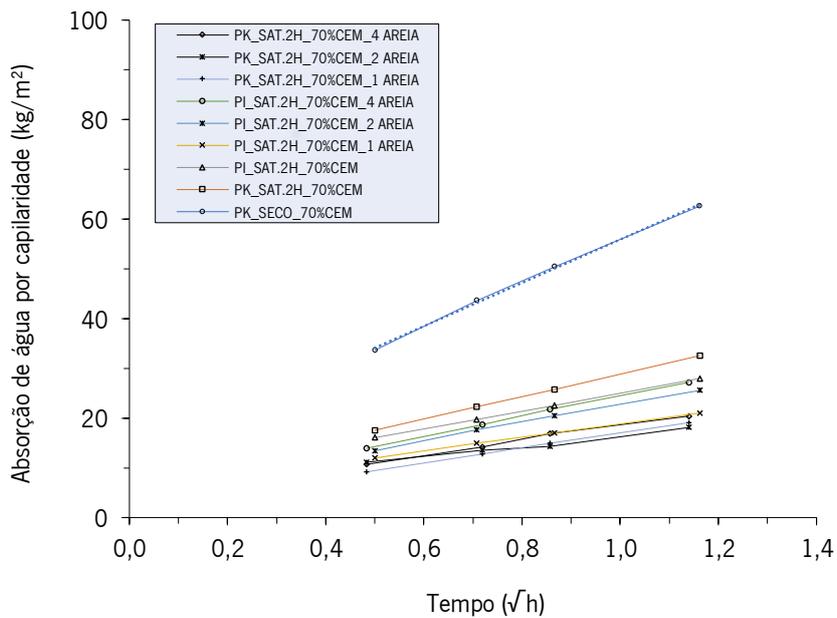


Figura 77 - Coeficiente médio de absorção de água para os intervalos de 15 a 90 minutos por capilaridade de todos os provetes realizados



Figura 78 - Capilaridade em todos os provetes após 90 min (6 á esquerda) e 15 min (restantes)

4.5. Ensaio de absorção de água por imersão

Tal como no ensaio anterior, este ensaio foi dividido em 3 grupos: inicialmente irão ser apresentados os resultados das misturas que não possuíam areia na sua constituição, em seguida as produzidas apenas com papel de impressão, tendo em conta as variações da quantidade de areia da sua matriz e, posteriormente, serão apresentados os resultados das composições que apenas possuíam papel *kraft* na sua realização.

Através da análise da Figura 79 pode-se observar que os provetes que apresentaram uma maior absorção média de água foram os PK_SECO_70%CEM, seguidos dos PK_SAT_70%CEM e PI_SAT.2H_70%CEM. É de ressaltar que o PK_SECO_70%CEM possui uma diferença de 66,1 kg/m^3 e de 99,36 kg/m^3 de absorção de água em relação aos restantes provetes PK_SAT.2H_70%CEM e PI_SAT.2H_70%CEM, respetivamente.

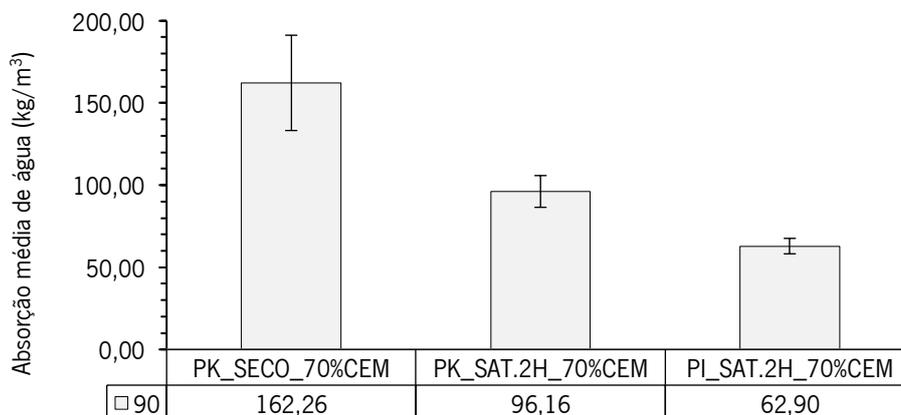


Figura 79 - Absorção média de água por imersão para as amostras que não possuem areia na sua composição

Em seguida, podemos ver a influência da junção de diferentes volumes de areia na matriz dos provetes realizados com papel de impressão (Figura 80). Observou-se que, o que possui a maior absorção de água é o PI_SAT.2H_70%CEM_1AREIA. Contudo, a diferença entre os restantes provetes não é muito significativa pois possuem valores da mesma ordem de grandeza.

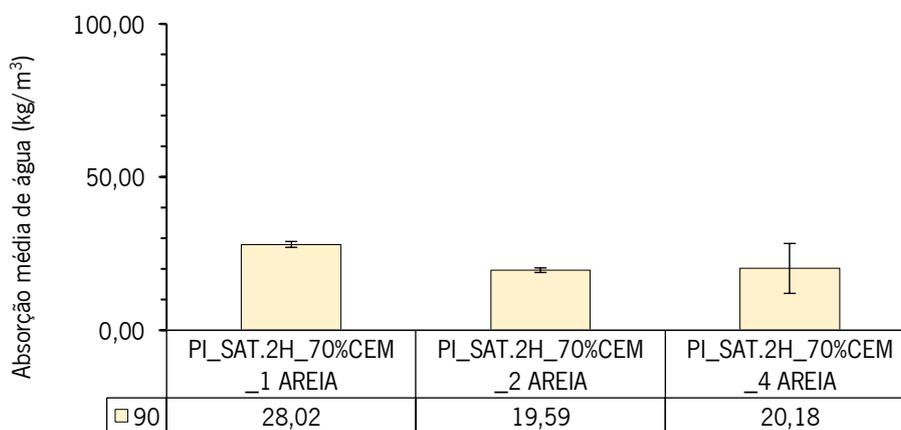


Figura 80 - Absorção média de água por imersão para as amostras com areia e papel de impressão na sua génese

Seguidamente, temos as amostras que relativamente às anteriores possuem uma única diferença, terem sido realizadas com papel *kraft* em vez de papel de impressão, mantendo as restantes variações de areia (Figura 81). Podemos observar que o comportamento é semelhante aos dos provetes anteriores (Figuras 79 e 80), sendo que o que apresenta uma maior absorção média de água é o PK_SAT.2H_70%CEM_1AREIA seguido do PK_SAT.2H_70%CEM_2AREIA e por fim PK_SAT.2H_70%CEM_4AREIA. Podemos observar também que, de uma forma geral, a diferença de água absorvida pelas diferentes amostras não é muito grande.

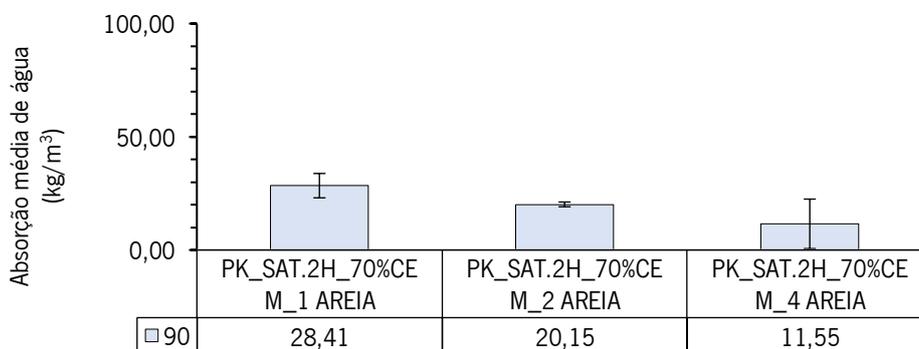


Figura 81 - Absorção média de água por imersão para as amostras com areia e papel *kraft* na sua génese

Por fim, através da análise da Tabela 14 e na Figura 82 podemos constatar que, de forma geral, todas as composições que não contêm areia na sua conceção são as que possuem maior absorção de água, sendo importante destacar que a PK_SECO_70%CEM possui um valor muito superior ao das restantes, por outra palavras esta é o que apresenta maior porosidade aberta com 162,26 %. É, também, observável que, de forma geral, os provetes que foram realizados com papel *kraft* possuem uma maior absorção de água relativamente aos que foram realizados com papel de impressão, sendo importante referir que este fenómeno não acontece com os provetes que foram realizados com 4AREIA (todos os provetes que possuem 4 copos de areia na sua constituição).

Tabela 14 - Absorção média de água por imersão para todos os provetes realizados

Mistura	Idade (d)	Absorção média de água (%)	Desvio Padrão (%)	Coefficiente de Variação (%)
PK_SECO_70%CEM	90	162,26	29,00	0,18
PK_SAT.2H_70%CEM		96,16	9,65	0,10
PI_SAT.2H_70%CEM		62,90	4,70	0,07
PI_SAT.2H_70%CEM_1 AREIA		28,02	0,97	0,03
PI_SAT.2H_70%CEM_2 AREIA		19,59	0,75	0,04
PI_SAT.2H_70%CEM_4 AREIA		20,18	8,15	0,40
PK_SAT.2H_70%CEM_1 AREIA		28,41	5,37	0,19
PK_SAT.2H_70%CEM_2 AREIA		20,15	1,04	0,05
PK_SAT.2H_70%CEM_4 AREIA		11,55	10,93	0,95

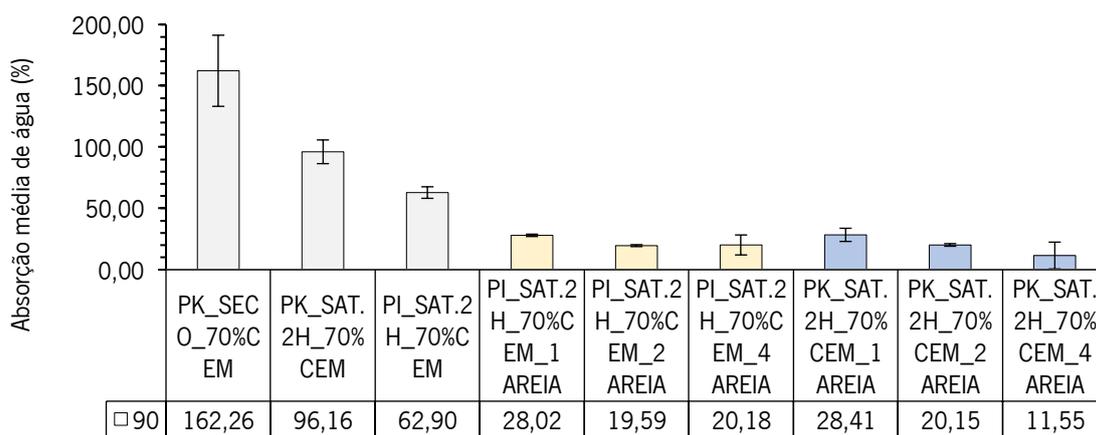


Figura 82 - Absorção média de água por imersão para as amostras com areia e papel de impressão na sua génese

4.5. Ensaio térmico

Neste ensaio, o esquema de apresentação dos resultados foi realizado da mesma forma que o adotado para os ensaios de absorção de água por capilaridade e por imersão.

Por isso, primeiramente podemos observar os resultados da condutibilidade térmica dos provetes que foram concebidos sem adição de areia. Por intermédio da análise da Figura 83 observamos que a melhor mistura é a PI_SAT.2H_70%CEM, seguindo-se da PK_SAT.2H.2H_70%CEM e da PK_SECO_70%CEM. Em relação à resistência térmica, de acordo com a Figura 84, o fenómeno da resistência térmica é invertido, sendo a composição que apresenta uma maior resistência térmica a PK_SECO_70%CEM, vindo posteriormente a PK_SAT.2H_70%CEM e a PI_SAT.2H_70%CEM. Este comportamento é observável na Figura 85, onde podemos constatar que a que possui maior fluxo de calor por hora é a composição PI_SAT.2H_70%CEM, sendo seguida pela PK_SECO_70%CEM.

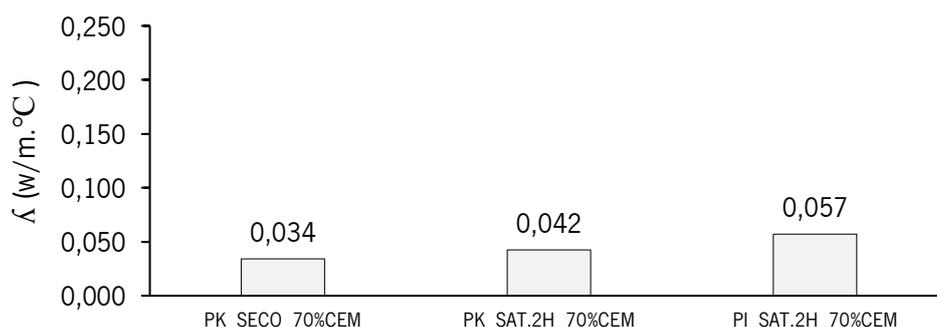


Figura 83 - Condutividade térmica para as amostras que não possuem areia na sua composição

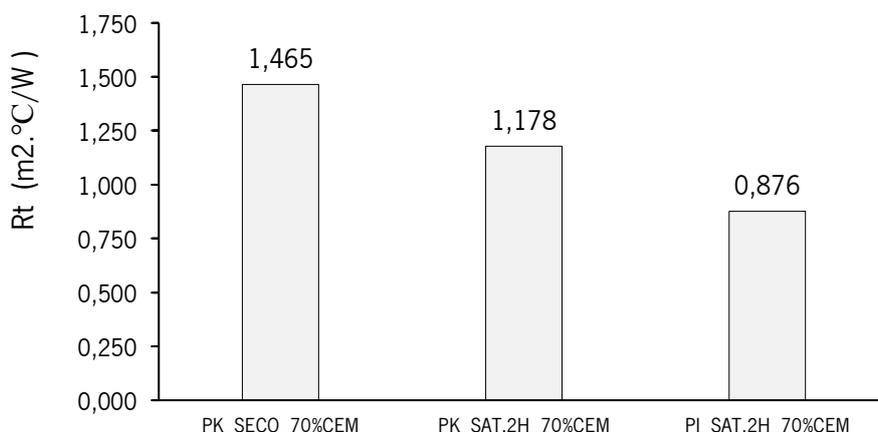


Figura 84 - Resistência térmica para as amostras que não possuem areia na sua composição

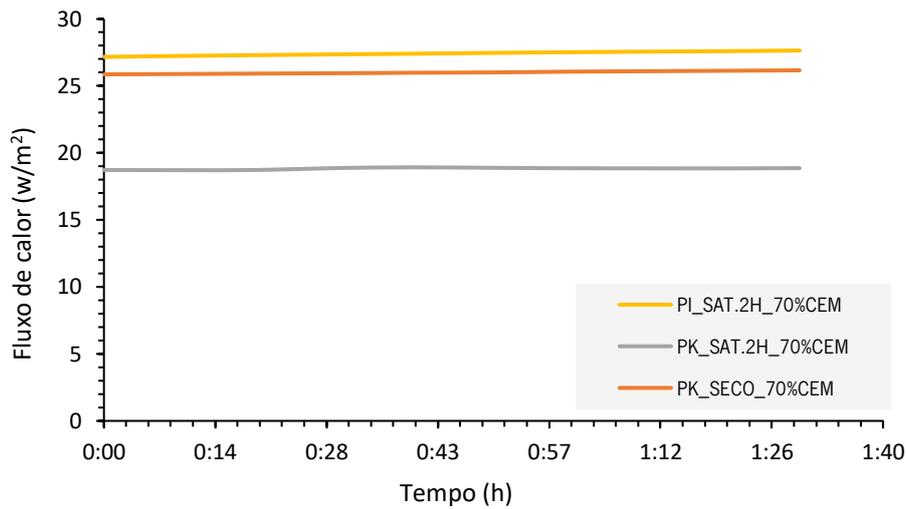


Figura 85 - Fluxo de calor para as amostras que não possuem areia na sua composição

Seguidamente, podemos observar o comportamento dos provetes de papel de impressão, onde foi variada a quantidade de areia utilizada na sua mistura. Analisando a Figura 86 podemos observar que a mistura que possui a maior condutibilidade térmica é a PI_SAT.2HCEM_2AREIA e a que possui um valor menor de condutibilidade térmica é a PI_SAT.2H_70%CEM_1AREIA. Relativamente à Figura 87 podemos constatar que o provete que possui maior resistência térmica é o PI_SAT_70%CEM_1AREIA e o que possui a menor resistência térmica é o PI_SAT.2H_70%CEM_2AREIA. Por fim, relativamente à Figura 88, podemos analisar que a mistura que possui o maior fluxo de calor em relação ao tempo é a PI_SAT.2HCEM_2AREIA, e a que possui menor valor é a PI_SAT.2H_70%CEM_1AREIA.

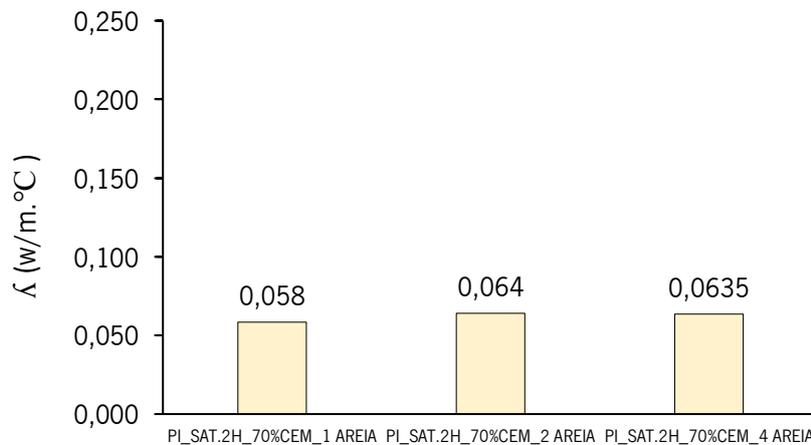


Figura 86 - Condutibilidade térmica para as amostras com areia e papel de impressão na sua génese

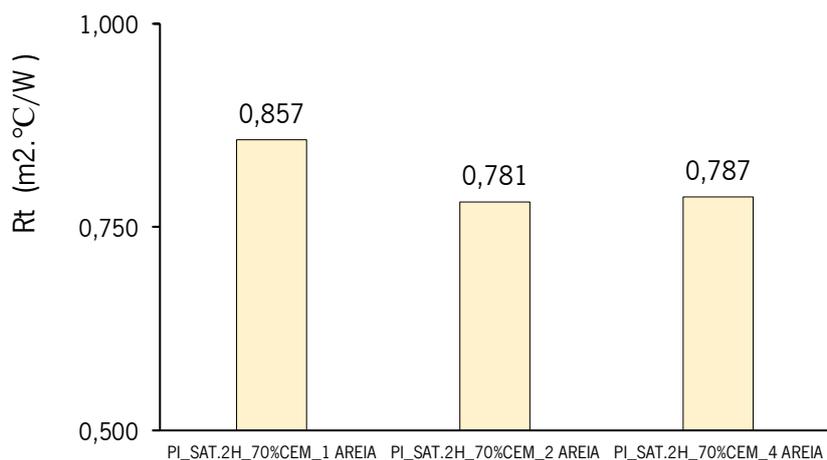


Figura 87 - Resistência térmica para as amostras com areia e papel de impressão na sua gênese

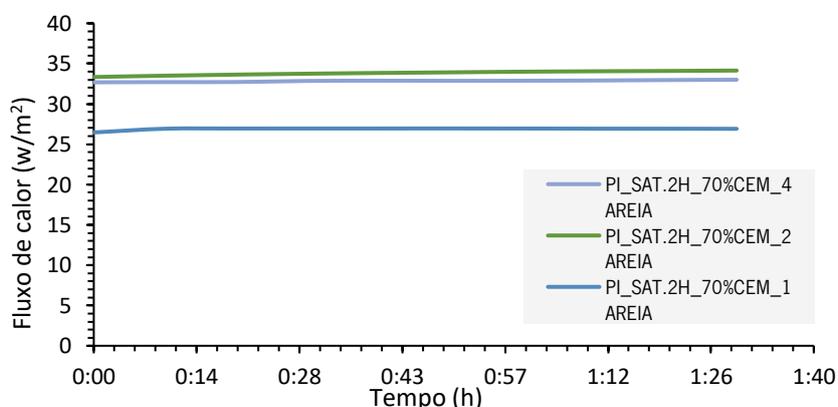


Figura 88 - Fluxo de calor para as amostras com areia e papel de impressão na sua gênese

Agora iremos analisar a influência da troca do papel de impressão pelo papel *kraft*. Podemos observar que o fenómeno que ocorre na Figura 89 é igual ao que ocorre no papel de impressão pois o que tem 2AREIA (todas as amostras com volume de 2 de areia na sua constituição) é a composição que possui a maior condutibilidade térmica sendo seguido pela PK_SAT.2H_70%CEM_4AREIA e, por fim, pela PK_SAT.2H_70%CEM_1AREIA. O contrário é visualizado na Figura 90, em que a composição que possui maior resistência térmica é a PK_SAT_70%CEM_1AREIA e a que apresenta menor é a PK_SAT_70%CEM_2AREIA. Relativamente à Figura 91 do fluxo térmico no intervalo escolhido de 1 hora e 30 minutos, este apresenta um comportamento igual à Figura 91 sendo que o maior corresponde ao *papercrete* PK_SAT_70%CEM_1AREIA e o menor ao PK_SAT_70%CEM_2AREIA.

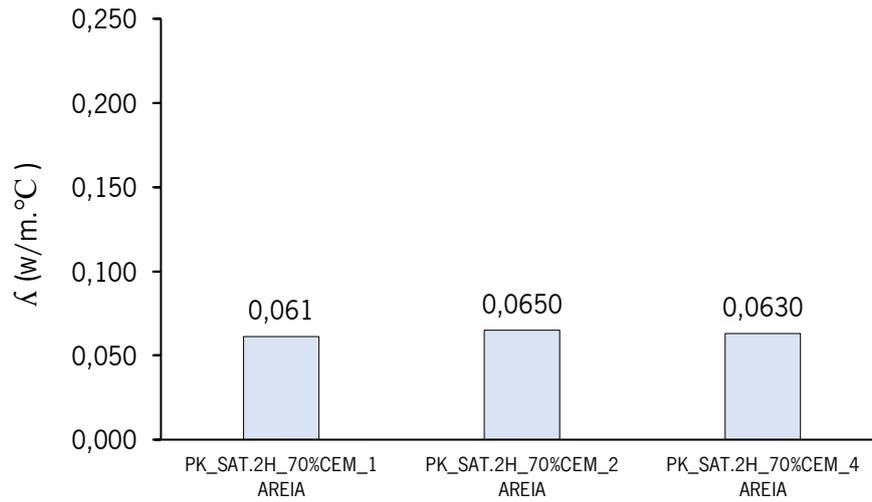


Figura 89 - Condutibilidade térmica para as amostras com areia e papel de *kraft* na sua gênese

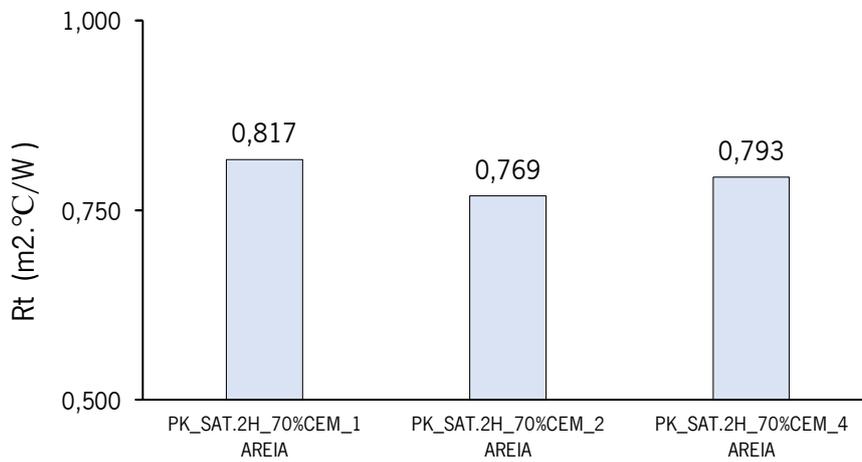


Figura 90 - Resistência térmica para as amostras com areia e papel *kraft* na sua gênese

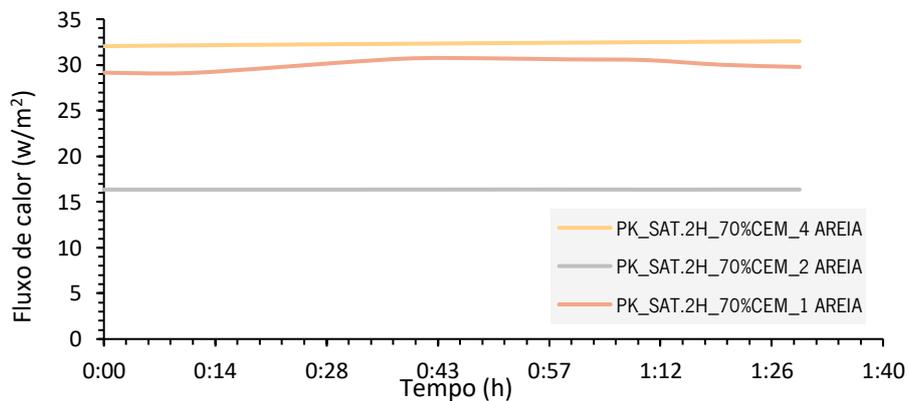


Figura 91 - Resistência térmica para as amostras com areia e papel *kraft* na sua gênese

Por fim, poderemos analisar, de uma forma geral, todos os resultados obtidos neste ensaio (Tabela 15). Relativamente à Figura 92, a mistura que possui maior condutividade térmica é a PK_SAT.2H_70%CEM_2AREIA e a que possui menor condutibilidade térmica é a PK_SECO_70%CEM. Na Figura 93 a mistura que possui uma maior resistência térmica é a PK_SECO_70%CEM e a que apresenta a menor é a PK_SAT.2H_70%CEM_2AREIA. Em relação à Figura 94 a mistura que apresenta um maior fluxo de calor em função do tempo é a PI_SAT.2H_70%CEM_2AREIA e a que apresenta a menor quantidade é a PK_SAT.2H_70%CEM_2AREIA. Logo, de uma de uma forma geral, é possível constatar que a presença de areia nos provetes melhora a condutividade térmica dos mesmo o que provoca uma consequente diminuição da resistência térmica. Todos os provetes que foram ensaiados com papel *kraft* na sua composição apresentam uma menor condutividade térmica relativamente aos mesmo provetes em que a única diferença que possuíam para estes era a utilização de papel de impressão, constatando-se que a mistura com o melhor desempenho neste parâmetro é a PK_SAT.2H_70%CEM.

Tabela 15 - Quadro geral dos resultados térmicos para todos os provetes realizados

Número	Material	Fluxo de calor (w/m ²)	U (W/m ² . °C)	λ (w/m.°C)	Rt (m ² .°C/W)	Espessura (m)
1	PK_SECO_70%CEM	26,01	0,83	0,034	1,465	0,050
2	PK_SAT.2H_70%CEM	18,83	1,09	0,042	1,178	0,050
3	PI_SAT.2H_70%CEM	27,43	1,62	0,057	0,876	0,050
4	PI_SAT.2H_70%CEM_1 AREIA	26,89	1,68	0,058	0,857	0,050
5	PI_SAT.2H_70%CEM_2 AREIA	33,83	1,92	0,064	0,781	0,050
6	PI_SAT.2H_70%CEM_4 AREIA	32,85	1,90	0,0635	0,787	0,050
7	PK_SAT.2H_70%CEM_1 AREIA	30,04	1,80	0,061	0,817	0,050
8	PK_SAT.2H_70%CEM_2 AREIA	16,36	1,97	0,0650	0,769	0,050
9	PK_SAT.2H_70%CEM_4 AREIA	32,34	1,88	0,0630	0,793	0,050

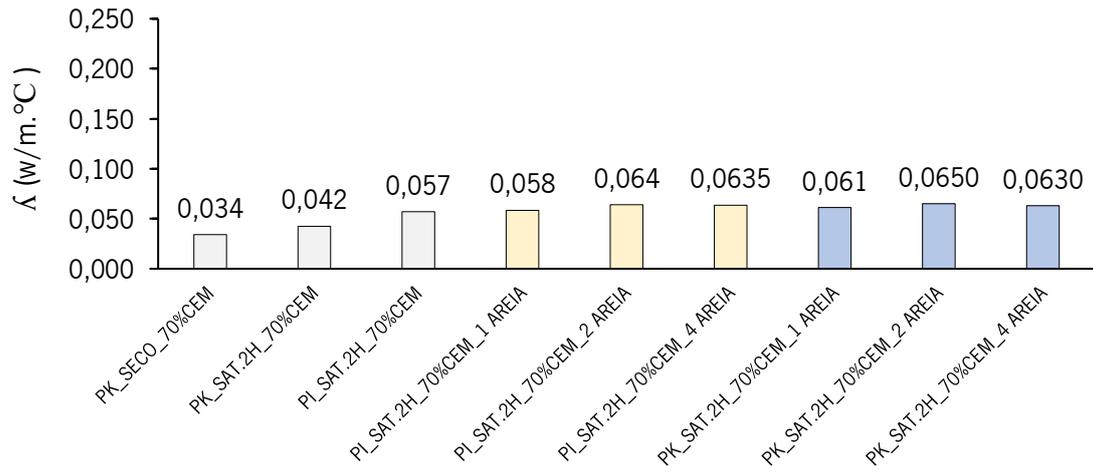


Figura 92 - Condutividade térmica para todos os provetes realizados

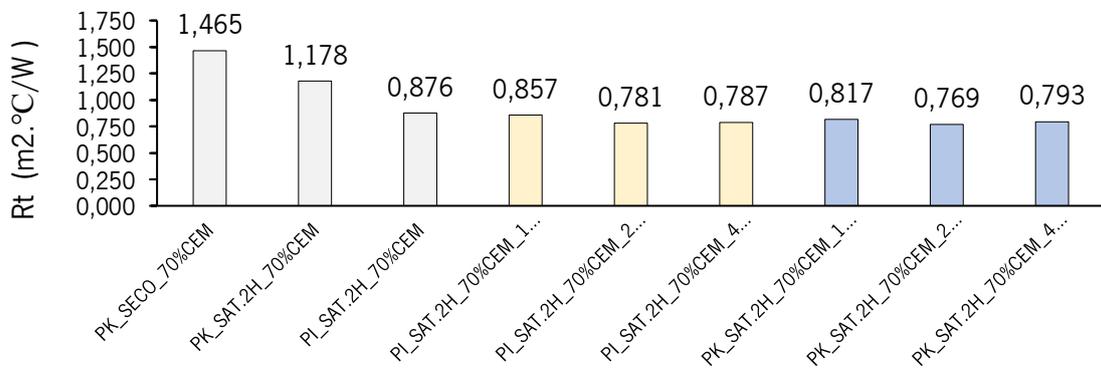


Figura 93 - Resistência térmica para todos os provetes realizados

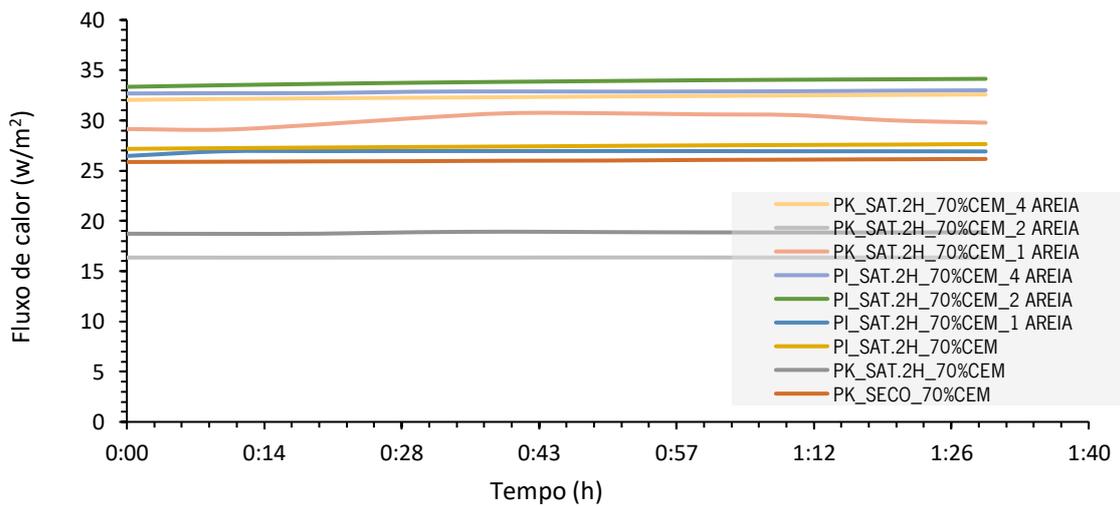


Figura 94 - Fluxo de calor para todos os provetes realizados

Comparando a Tabela 15 com a Tabela 16 podemos observar que, de forma geral, todos os provetes de *papercrete* apresentam valores de condutibilidade térmica muito idênticos com os utilizados normalmente em obra, destacando-se os provetes PK_SECO_70%CEM ($\lambda = 0,034$ w/m.°C), PK_SAT.2H_70%CEM ($\lambda = 0,042$ w/m.°C) e PI_SAT.2H_70%CEM ($\lambda = 0,057$ w/m.°C), sendo estes os provetes que mais se aproximam dos valores de condutibilidade térmica dos materiais geralmente utilizados em obra para isolamento térmico.

Tabela 16 - Condutibilidade térmica de isolantes térmicos geralmente utilizados em obra

Nome do material		Condutibilidade térmica (w/m.°C)
Espuma rígida de poliuretano		0,029 a 0,03
Espuma rígida à base de PVC		0,031 a 0,034
Espuma Fenólica		0,044
Fibras ou lãs de vidro ou de rocha		0,041
Espuma de vidro	120 a 130 kg/m ³	0,050
	130 a 140 kg/m ³	0,055
	140 a 180 kg/m ³	0,063
Cortiça		0,043
Pasta de madeira		0,05
Vermiculite	200 a 300 kg/m ³	0,1
	300 a 400 kg/m ³	0,14
	400 a 500 kg/m ³	0,19

4.6. Análise microscópica

Nestas próximas tabelas 17, 18 e 19 é possível observar os resultados obtidos através de uma observação binocular dos provetes realizados com uma ampliação de x400 e x100 assim como as suas respetivas observações de forma a caracterizar melhor os provetes estudados.

Tabela 17 - Observação binocular das amostras sem areia na sua génese

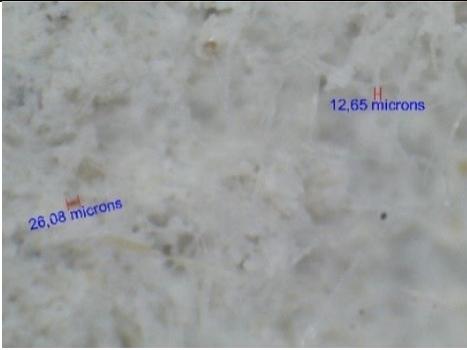
Análise microscópica dos provetes		
Cura (d)	90	
Nome	Ampliação x400	Ampliação x100
PK_SECO_70%CEM		
	Nesta mistura visualiza-se uma vasta rede de fibras de celulose com uns resíduos colados (círculo vermelho), de cor acastanhada, poros e algumas fendas	
PK_SAT.2H_70%CEM		
	Nesta mistura visualiza-se uma vasta rede de fibras de celulose com uns resíduos colados, de cor acastanhada, poros e algumas fendas.	
PI_SAT.2H_70%CEM		
	Observação: Nesta mistura visualiza-se uma pequena rede de fibras de celulose com uns resíduos colados, de cor acinzentadas , poros e algumas fendas.	

Tabela 18 - Observação binocular das amostras com areia e papel de impressão na sua génese (continuação)

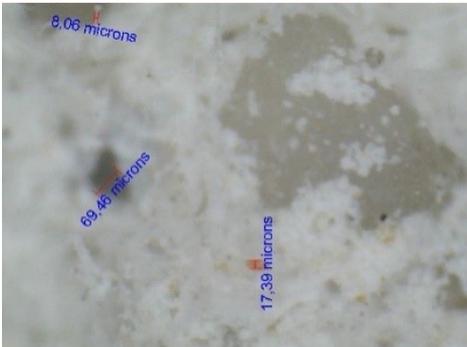
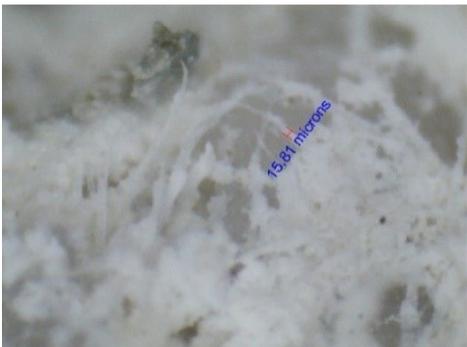
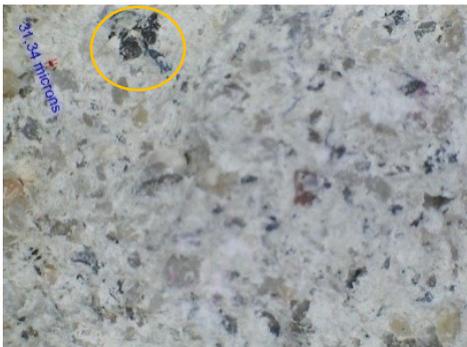
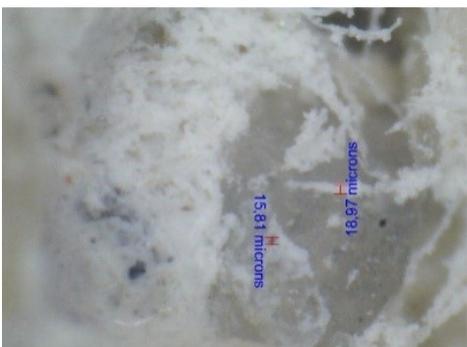
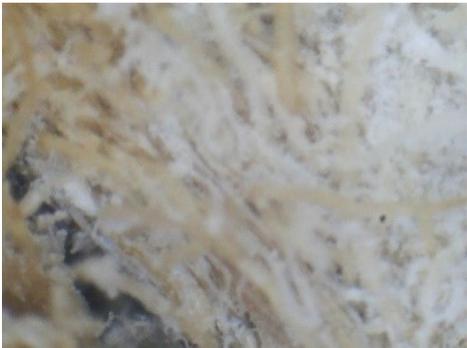
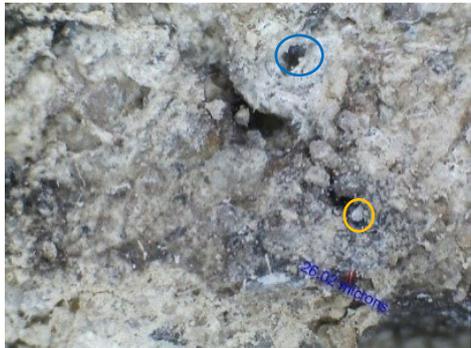
Análise microscópia dos provetes		
Cura (d)	90	
Nome	Ampliação x400	Ampliação x100
PI_SAT.2H_70%CEM_1 AREIA		
Observação: Nesta mistura, é possível observar apresenta menos fibras, apresenta uns resíduos claros, possui alguns poros e consegue-se detetar os minerais de areia (círculo laranja).		
PI_SAT.2H_70%CEM_2 AREIA		
Observação: Nesta mistura, é possível observar que apresenta menos fibras, com uns resíduos claros, possui alguns poros e consegue-se detetar os minerais de areia (círculo laranja).		
PI_SAT.2H_70%CEM_4 AREIA		
Observação: Nesta mistura, é possível observar que apresenta menos fibras, com uns resíduos claros, possui alguns poros e consegue-se detetar os minerais de areia (círculo laranja).		

Tabela 19 - Observação binocular das amostras com areia e papel *kraft* na sua génese (continuação)

		Análise microscópia dos provetes	
Cura (d)		90	
Nome		Ampliação x400	Ampliação x100
PK_SAT.2H_70%CEM_1 AREIA			Observação: Nesta mistura, é possível observar que apresenta menos fibras com uns resíduos claros, de cor acastanhada (círculo amarelo), possui alguns poros, fungos (círculo azul), e consegue-se detetar os minerais de areia (círculo laranja).
PK_SAT.2H_70%CEM_2 AREIA			Observação: Nesta mistura, é possível observar que apresenta menos fibras com uns resíduos claros, de cor acastanhada, possui alguns poros, fungos e consegue-se detetar os minerais de areia (círculo laranja).
PK_SAT.2H_70%CEM_4 AREIA			Observação: Nesta mistura, é possível observar que apresenta menos fibras com os resíduos claros, de cor acastanhada, possui alguns poros, fungos (círculo azul) e consegue-se detetar os minerais de areia (círculo laranja).

5. Conclusões

Esta dissertação de mestrado foi realizada com o intuito de caracterizar experimentalmente blocos de *papercrete*, realizados com dois tipos de papel diferentes (resíduo de papel *kraft* e papel de impressão) de forma a estudar as suas propriedades mecânicas, absorção de água e térmicas.

Relativamente às propriedades mecânicas, tanto no ensaio à flexão como no de resistência à compressão, os resultados, no geral, foram similares, concluindo-se que os materiais que levam a um melhor comportamento mecânico são os que possuem papel de impressão na sua génese. A adição de diferentes volumes de areia conduziu a um decaimento das suas resistências mecânicas em relação aos mesmos provetes sem esses volumes de areia, logo a adição de areia neste parâmetro não se revelou muito benéfica. Por fim, podemos observar que, através dos resultados obtidos, este material não poderá ser utilizado como um betão estrutural. Contudo, a sua elasticidade permite que este possa ter uma boa utilização para recobrimentos ou revestimentos.

As propriedades de absorção de água revelaram que este material é de fácil absorção de água tanto por capilaridade como por imersão, tal como o esperado pelo facto de o papel ser um material muito absorvente. De forma geral, a adição de diferentes volumes de areia a estes provetes fez com que estes tivessem uma absorção de água menor, destacando-se neste parâmetro as misturas de papel *kraft* com 1 dosagem de areia, concluindo-se que este é o papel que apresenta melhores resultados neste parâmetro. A adição de areia provoca uma menor absorção de água, logo este material é mais aconselhado para a aplicação no interior. Assim, evita o contacto com a água, uma vez que é visível através dos ensaios das propriedades mecânicas que os provetes ensaios saturados durante 24H tiveram um grande decaimento da sua resistência em relação aos mesmos sem terem sido saturados.

Relativamente ao comportamento térmico, pode-se concluir que o papel que confere sempre uma maior resistência térmica é o papel *kraft* e que a adição de diferentes volumes de areia provocou uma diminuição da resistência térmica, permitindo concluir que a adição de areia não é benéfica. Através da comparação com materiais convencionalmente utilizados em obra podemos ver que o valor dos melhores provetes se assemelha muito ao que estes possuem.

Por fim, podemos concluir que em termos mecânicos o papel que confere melhor resistências é o papel de impressão. Contudo, nos restantes parâmetros, o papel com o melhor comportamento é o papel *kraft*. Relativamente à adição de areia, em todos os provetes se revelou desnecessária, tanto na resistência mecânica, como no seu comportamento térmico. Contudo, relativamente à absorção de água fez com que não fosse tanta água absorvida e, como é óbvio, permitiu diminuir a dosagem de cimento, tornando as misturas menos onerosas e mais sustentáveis.

Este material, desenvolvido através de todas as suas características apresentadas, pode servir como um material de revestimento e isolante térmico interno, não estando em contacto com zonas molhadas. Contudo, ainda é importante saber quais as suas propriedades acústicas, o seu comportamento quando exposto ao fogo e tipos de tratamentos que este possa ser sujeito de forma a reduzir a sua capacidade de absorção de água.

Bibliografia

- Aguiar, J. B. (2009). *Materiais de construção II*. Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil .
- Ahmad, A., Adil, M., Khalil, A., & Rahman, M. (2021). *Mechanical properties and durability of boardcrete blocks prepared from recycled cardboard*. *Journal of Building Engineering*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2020.101644>
- ASTM International, ASTM C1585 – 4 (2017). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic – Cement Concretes*.
- Awoyera, P. O., Olalusi, O. B., & Babagbale, D. P. (2021). *Production of lightweight mortar using recycled waste papers and pulverized ceramics: Mechanical and microscale properties*. *Journal of Building Engineering*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102233>
- BS EN 1015 – 3 (2004). *Methods of test for mortar for masonry – Part 3 : Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)*, British Standards Institution. 389 Chiswick High Road. Londres.
- BS EN 1015 – 3 (2002). *Methods of test for mortar for masonry – Part 18: Determination of water absorption coefficient due capillary action of hardened mortar*. British Standards Institution, 389 Chiswick High Road. Londres.
- C. Choi, H. Yun, & H. Jung. (2018). *Mechanical properties of papercrete containing waste paper*.
- Camões, A. (2002). *Betões de elevado desempenho com incorporação de cinzas volantes*. Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil.
- Ficha técnica CEM II B-L 32,5N*. www.cimpor.com. Consultado a 13/02/2023
- Gomes, F. À. (2021). *Placas à base de desperdícios para paredes*. Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil.
- ISO, 9869 (1994). *Thermal Insulation - Building elements – In-Situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance*. International Organization for Standardization, Genebra.

- ITE50 – LNEC (2006). *Coefficientes de Transmissão Térmica DE Elementos Da Envolvente Dos Edifícios*. ICT Informação Técnica. Lisboa.
- Lage, I., Lizancos, M., Burgo, P., Fernández, M., & Herrero, C. (2016). *Concretes and mortars with waste paper industry: Biomass ash and dregs*. *Journal of Environmental Management*.
- Lanzinha, M. (2021). *Estudo experimental de bloco leve à base de aparas de madeira e resíduos de papel*. Universidade do Minho. Departamento de Engenharia Civil.
- LNEC E 65(1980). *Cimentos – Determinação da superfície específica*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Portugal.
- NP EN 196-1 (2006). *Métodos de ensaios de cimento – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*. Lisboa. Outubro.
- NP EN 1097 – 5 (2002). *Ensaio das propriedades mecânicas e físicas dos agregados – Parte 5: Determinação do teor de humidade por secagem em estufa ventilada*. Lisboa. Setembro.
- Papel: história, composição, tipos, produção e reciclagem*. (2022). <https://www.recicloteca.org.br/material-reciclavel/papel/>.
- P.K. Latha, Y.Darshana, & Vidhya Venugopal. (2015). *Role of building material in thermal comfort in tropical climates - A review*.
- Solahuddin, B. A., & Yahaya, F. M. (2021). *Properties of concrete containing shredded waste paper as an additive*. *Materials Today: Proceedings*, 51, 1350–1354. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.11.390>
- Syed Kaiser, B., Maqbool, Y., & Ayaz Mohmood, D. (2016). *A study of papercret towards building sustainable and resilient infrastructure*. *I-Manager's Journal on Structural Engineering*, 5(2), 27. <https://doi.org/10.26634/jste.5.2.8155>