

CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DE ARGAMASSAS TÉRMICAS COM EPS E AEROGEL DE SÍLICA

Filipa Silveira Baptista da Silva

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientação

Professora Doutora Inês dos Santos Flores Barbosa Colen

Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Júri

Presidente: Professor Doutor Albano Luís Rebelo da Silva das Neves e Sousa

Orientador: Professora Doutora Maria da Glória de Almeida Gomes

Vogal: Doutor Luís Manuel Cordeiro Matias

Maio 2017

Resumo

Com o aumento dos padrões de conforto térmico e conseqüentemente do consumo de energia para aquecimento e arrefecimento dos edifícios, surge o interesse na indústria da construção pela utilização de materiais de desempenho térmico melhorado. Neste sentido as argamassas térmicas e os nanomateriais podem desempenhar um papel importante na eficiência energética dos edifícios.

O presente estudo incide sobre a determinação da condutibilidade térmica de duas argamassas térmicas. A condutibilidade térmica foi medida por diferentes métodos, dois transientes e três estacionários, com o propósito de comparar os resultados obtidos com cada um dos métodos e avaliar a variabilidade entre eles quando aplicados a materiais com condutibilidades térmicas reduzidas. Este estudo revela que os diferentes métodos obtêm resultados com variações relevantes, tendo-se obtido valores de 0,0495 a 0,0584 W/m.K para a mesma argamassa. Todos os resultados obtidos para os diferentes métodos foram superiores ao valor declarado pelo fabricante, tendo-se verificado que as condições de teor de humidade e de temperatura das amostras alteram os resultados.

Palavras-Chave: Condutibilidade térmica, métodos estacionários, métodos transientes, argamassas térmicas, aerogel

Abstract

With the increase of indoor comfort requirements and consequently the building energy consumption for heating and cooling, the interest in materials with good thermal properties has been explored. Thermal mortars and nanomaterials could have an important role in energy efficient of buildings.

In the present work, the thermal conductivity of two thermal mortars was measured by different methods, two steady-state and tree transient methods, with the propose of comparing the results obtained with each method and it's variability in the study of very low thermal conductivity materials. This study revealed that the different methods obtain results with high variations, values between 0,0495 and 0,0584 W/m.K were obtained for the same mortar. Furthermore, it was concluded that all the results obtained in the laboratory were higher than the value declared by the product and that were dependent on the moisture content and temperature of the samples.

Key words: Thermal conductivity, steady-state methods, transient's methods, thermal mortars, aerogel

Agradecimentos

A realização deste trabalho, que tanta dedicação exigiu e que tanto me enriqueceu cientificamente, não teria sido possível sem a contribuição de algumas pessoas a quem quero deixar o meu agradecimento.

Às Professoras Inês Flores-Colen e Maria da Glória Gomes pela orientação científica deste trabalho, pela disponibilidade e pela simpatia e motivação que me transmitiram para a realização do mesmo.

Ao Eng. Marco Pedroso, bolseiro de investigação no IST, por todo o apoio, disponibilidade e transmissão de conhecimentos, em especial na realização dos ensaios experimentais.

Ao Doutor Rui Novais, de Departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica da Universidade de Aveiro, por todo o apoio e ensaios realizados.

Às Professoras Laura Ilharco e Maria Júlio pela disponibilidade e apoio na realização em parte dos ensaios experimentais.

Ao COMPETE 2020, uma vez que a investigação foi realizada no âmbito do Projeto PEP- Parede Eficiente Plus (POCI-01-0247-FEDER-017417).

À empresa Weber pelo fornecimento da argamassa industrial estudada.

Ao Sr. Leonel Silva, ao Sr. Pedro Costa e ao Eng. Pedro Sanches, técnicos do Laboratório de Construção do IST, por toda a ajuda e disponibilidade durante os ensaios de laboratório.

Aos meus amigos e alguns colegas, em particular, à Francisca Freitas, à Ana Custódio, ao Pedro Ribeiro, à Diana Corrêa e à Nicole Calção pela motivação para a realização deste trabalho.

Um agradecimento especial à minha amiga e colega Joana Beringuilho, pela amizade e por todo o apoio, pela partilha e pela motivação que me deu ao longo desta etapa e para este trabalho final.

Ao Narciso Custódio por todo apoio, carinho e compreensão ao longo de todo este percurso, que me apoiou desde o início e sem o qual esta etapa teria sido muito mais difícil.

À minha família, à minha Mãe, ao meu Pai e à minha irmã Marta, por todo o apoio, pela dedicação, incentivo e acompanhamento ao longo deste percurso e deste trabalho final.

ÍNDICE

Resumo	III
Abstract	IV
Agradecimentos	V
Índice.....	VI
Índice de figuras	VIII
Índice de tabelas	IX
Simbologia.....	XI
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
2 Argamassas de desempenho térmico melhorado.....	5
2.1 Considerações iniciais	5
2.2 Enquadramento.....	5
2.3 Sistemas de desempenho térmico melhorado	6
2.4 Argamassas de revestimento	8
2.4.1 Enquadramento histórico.....	8
2.4.2 Funções e desempenho das argamassas de revestimento	9
2.5 Argamassas térmicas	9
2.5.1 Constituintes das argamassas térmicas.....	11
2.5.2 Outras aplicações do aerogel como material isolante	15
2.5.3 Exigências normativas	18
2.5.4 Medição do coeficiente de condutibilidade térmica.....	18
2.5.5 Estudos comparativos de diferentes métodos.....	21
2.6 Argamassas com aerogel de sílica	23
2.7 Síntese de capítulo	25
3 Campanha experimental	27
3.1 Considerações iniciais	27
3.2 Descrição dos materiais a ensaiar	27
3.2.1 Argamassa industrial com granulado de poliestireno expandido (A ^{EPS}).....	27
3.2.2 Aerogel de sílica	28
3.3 Composições produzidas a ensaiar.....	29

3.4	Provetes produzidos	29
3.5	Procedimento experimental	31
3.6	Descrição dos ensaios a realizar	33
3.6.1	Caracterização das argamassas no estado fresco	33
3.6.2	Caracterização das argamassas no estado endurecido	35
3.7	Tratamento de dados	44
3.8	Síntese do capítulo	46
4	Análise e discussão dos resultados	49
4.1	Considerações iniciais	49
4.2	Caracterização no estado fresco	49
4.2.1	Massa volúmica	49
4.3	Caracterização no estado endurecido	50
4.3.1	Massa volúmica	50
4.3.2	Coeficiente de condutibilidade térmica	51
4.3.3	Teor de água.....	58
4.4	Caraterização no estado endurecido seco	59
4.4.1	Massa volúmica	59
4.4.2	Coeficiente de condutibilidade térmica	60
4.5	Correlações.....	64
4.5.1	Condutibilidade térmica em função do teor de água.....	64
4.5.2	Coeficiente de condutibilidade térmica em função da massa volúmica aparente.....	66
4.5.3	Capacidade calorífica volumétrica em função do teor de água	67
4.6	Síntese do capítulo	67
5	Conclusões e desenvolvimentos futuros	69
5.1	Proposta de trabalhos futuros	70
6	Referências.....	73
Anexos	a
A1 - Valores individuais para a massa volúmica aparente	a
A2 - Valores individuais para diferentes teores de água.....	b
A3 - Cálculos intermédios método disco de Lee	c

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Sistema de ETICS clássico [W5].....	6
Figura 2.2: Poliestireno expandido em granulado [W6].....	14
Figura 2.3: Duas mantas de spaceloft em cor branca e cinza (Aspen Aerogels).	16
Figura 2.4: Aerogels em granulado [W1] e em placa [W2].	17
Figura 2.5: Representação esquemática dos métodos estacionários, a) Guarded Hot Plate e b) Heat Flow Meter (adaptado de Franco, 2007)	20
Figura 2.6: Esquema ensaio Disco de Lee a) fase 1 b) fase 2	20
Figura 2.7: Método transiente de fonte plana (TPS) [W9].....	21
Figura 2.8: Método transiente modificado de fonte plana (MTPS) [W9]	21
Figura 2.9: Método transiente de fonte linear (TLS) [W9].....	21
Figura 3.1: Aerogel em granulado utilizado.....	28
Figura 3.2: Provetes cilíndricos para utilização do equipamento ISOMET e disco de Lee, à esquerda por preencher e à direita já preenchidos.....	31
Figura 3.3: Provetes prismáticos para os ensaios com os métodos Heat Flow Meter a) HFM1 e b) HFM2	31
Figura 3.4: Aspeto da argamassa A ^{EPS+Ag} depois de misturada.	32
Figura 3.5: Cilindro utilizado para medir a massa volúmica aparente no estado fresco.....	34
Figura 3.6: Pesagem de provete para ensaio de determinação de massa volúmica.	36
Figura 3.7: Ensaio com o equipamento ISOMET – sonda de Superfície.....	38
Figura 3.8: Ensaio com o equipamento Rapid K.	39
Figura 3.9: Esquema de ensaio, método HFM2 (adaptado de Senff et al., 2016)	41
Figura 3.10: Ensaio com o método Disco de Lee.....	43
Figura 4.1: Comparação entre os resultados dos diferentes métodos utilizados.	57
Figura 4.2: Variação relativa dos resultados obtidos para os diferentes métodos e o valor declarado pelo fabricante.	57

Figura 4.3: Comparação dos resultados obtidos para os diferentes métodos utilizados para o estado endurecido seco.	63
Figura 4.4: Provede destinado ao ensaio HFM1 após fissuração.....	63
Figura 4.5: Correlação do coeficiente de condutibilidade térmica em função do teor de água das amostras	65
Figura 4.6: Relação entre a massa volúmica e a condutibilidade térmica dos provedes da argamassa A ^{EPS}	66
Figura 4.7: Relação entre a massa volúmica e a condutibilidade térmica dos provedes da argamassa A ^{EPS+Ag}	66
Figura 4.8: Capacidade térmica volumétrica em função do teor de água dos provedes.....	67

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1: Tabela resumo das características de argamassas industriais	11
Tabela 2.2: Tabela das exigências das argamassas térmicas segundo a norma EN 998-1 (2010)..	18
Tabela 2.3: Comparação entre métodos em outros estudos	22
Tabela 2.4: Tabela resumo de estudos feitos em argamassas com aerogel de sílica.....	24
Tabela 3.1: Características da argamassa industrial A ^{EPS} (WSG, 2017)	28
Tabela 3.2: Características do Aerogel comercial utilizado (ENERSENS, 2013)	28
Tabela 3.3: Constituições das composições a ensaiar	29
Tabela 3.4: Descrição dos provetes a ensaiar	30
Tabela 3.5: Tabela resumo das características dos equipamentos utilizados para medir o coeficiente de condutibilidade térmica	37
Tabela 3.6: Síntese dos ensaios realizados neste estudo.	48
Tabela 4.1: Resultados obtidos para a massa volúmica aparente no estado fresco.	49
Tabela 4.2: Resultados obtidos para a massa volúmica aparente no estado endurecido para os provetes destinados à sonda de superfície.	50
Tabela 4.3: Resultados obtidos para a massa volúmica aparente no estado endurecido para os provetes destinados à sonda de agulha.	50
Tabela 4.4: Resultados obtidos para a massa volúmica aparente no estado endurecido para os provetes destinados ao ensaio HFM1	51
Tabela 4.5: Coeficiente de condutibilidade térmica no estado endurecido para o ensaio com a sonda de superfície.	52
Tabela 4.6: Coeficiente de condutibilidade térmica no estado endurecido para o ensaio com a sonda de agulha.	52
Tabela 4.7: Coeficiente de condutibilidade térmica no estado endurecido para o ensaio HFM1	53
Tabela 4.8: Coeficiente de condutibilidade térmica para o estado endurecido para os provetes destinados ao ensaio HFM2	53

Tabela 4.9: Coeficiente de condutibilidade térmica para o estado endurecido para o ensaio disco de Lee.....	53
Tabela 4.10: Comparação dos resultados obtidos para a condutibilidade térmica para os diferentes métodos, para a temperatura de 23°C [W/m.K]	56
Tabela 4.11: Comparação dos valores de condutibilidade térmica corrigidos para o estado seco para os restantes métodos comparativamente aos obtidos diretamente do método HFM2 [W/m.K]	58
Tabela 4.12: Teores de água médios dos provetes	58
Tabela 4.13: Massa volúmica aparente no estado seco para as amostras destinadas ao ensaio com a sonda de superfície.....	60
Tabela 4.14: Massa volúmica aparente no estado seco para os provetes destinados ao ensaio com a sonda de agulha.....	60
Tabela 4.15: Massa volúmica aparente no estado seco para os provetes destinados ao ensaio HFM1	60
Tabela 4.16: Coeficiente de condutibilidade térmica no estado seco para as amostras destinadas ao ensaio com a sonda de superfície	61
Tabela 4.17: Coeficiente de condutibilidade térmica no estado seco para os provetes destinados ao ensaio com a sonda de agulha	61
Tabela 4.18: Coeficiente de condutibilidade térmica no estado seco para os provetes destinados aos ensaios HFM1	62
Tabela 4.19: Influência da introdução de aerogel na massa volúmica e na condutibilidade térmica.....	64

Simbologia

Caracteres gregos

ρ	Massa volúmica aparente	[kg/m ³]
λ	Coefficiente de condutibilidade térmica	[W/m.K]
Δt	Intervalo de tempo	[s]
ΔT	Gradiente de temperatura	[°C]
c_p	Capacidade térmica volumétrica	[J/m ³ .K]

Acrónimos

A ^{EPS}	Argamassa industrial com EPS
A ^{EPS+Ag}	Argamassa industrial com EPS e adição de aerogel
EPS	Poliestireno expandido
GHP	<i>Guarded Hot Plate</i>
HFM	<i>Heat Flow Meter</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IST	Instituto Superior Técnico
MTPS	<i>Modified Transient Plane Source</i>
REH	Regulamento dos Edifícios de Habitação
RCCTE	Regulamento das características térmicas dos edifícios
TLS	<i>Transient Line Source</i>
TPS	<i>Transient Plane Source</i>

1 INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

Cada vez mais o uso de materiais com comportamento térmico melhorado na construção e reabilitação de edifícios tem suscitado interesse na comunidade científica. Em Portugal, no ano de 2005, os edifícios foram responsáveis por 62% do consumo de energia elétrica nacional, dos quais se destaca o sector residencial com 29% (Comini *et al.*, 2008). No mesmo estudo é ainda referido que as intervenções em edifícios, na ótica da eficiência energética, podem reduzir estes consumos em 30-35% para o mesmo nível de conforto.

A temperatura interior dos edifícios depende essencialmente de dois fatores: as condições climáticas e as propriedades termofísicas. Como condições climáticas refira-se a temperatura do ambiente exterior, a radiação solar e a velocidade do vento. Relativamente às propriedades termofísicas cita-se a condutibilidade térmica dos materiais e o coeficiente de transmissão térmica das soluções da envolvente; a espessura das paredes; a área de envidraçados e a exposição solar a que estão sujeitos (Lucas *et al.*, 2011).

A legislação portuguesa na área da térmica teve início em 1990 com o primeiro Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE). Este documento foi, entretanto, revisto em 2006 e atualizado de acordo com as diretivas do parlamento europeu em 2013. Encontra-se em vigor o decreto de lei N° 118/2013, de 20 de Agosto, onde está incluído o regulamento do desempenho energético dos edifícios de habitação (REH) [W7].

Atualmente a União Europeia assumiu o compromisso para o ano 2020 de construir edifícios com necessidades quase nulas de energia (NZEB -*Net zero energy buildings*), isto é, em que o consumo de energia destes edifícios seja colmatado pela energia fornecida por fontes de energia renováveis [W7].

De uma maneira geral, os nanomateriais têm desempenhado um papel importante na proteção do ambiente e na sustentabilidade, por isso, espera-se que no futuro a nanotecnologia possa conduzir ao desenvolvimento de novos materiais de desempenho térmico melhorado (Soares *et al.*, 2014).

Atualmente tem-se vindo a assistir a uma grande competitividade entre os diferentes fabricantes destes materiais no que diz respeito ao valor declarado de condutibilidade térmica dos seus produtos.

Neste sentido, o interesse por materiais com boas características térmicas tem aumentado exponencialmente. O aerogel, neste campo, tem-se mostrado como um dos materiais mais promissores para o uso nas construções. Apesar de os custos de produção deste material ainda serem um pouco elevados espera-se que estes decresçam com o sucessivo aumento de interesse, o que permitirá não só o desenvolvimento de técnicas mais avançadas para a sua produção como também a sua produção a larga escala (Ibrahim et al., 2015).

Ainda assim, apesar do seu elevado custo, a poupança obtida em termos de consumo de energia, utilizada para aquecimento e arrefecimento do ambiente interior dos edifícios, permite que o utilizador amortize o investimento (Brás et al., 2012) citado por (Soares et al., 2012).

1.2 OBJETIVOS

A presente dissertação assenta no estudo de argamassas térmicas industriais com incorporação de nanopartículas de aerogel. Pretende-se estudar a influência da introdução destas partículas em argamassas térmicas industriais quanto à sua massa volúmica e ao seu coeficiente de condutibilidade térmica e também identificar a influência dos diferentes parâmetros de ensaio, como a temperatura e o teor de humidade, na obtenção dos resultados.

Outro objetivo deste estudo é a comparação dos resultados obtidos para os diferentes métodos de medição do coeficiente de condutibilidade térmica no estudo destes materiais, caracterizados por serem materiais com condutibilidades térmicas muito baixas. Para o efeito, foi feita uma campanha experimental onde foram utilizados cinco métodos e equipamentos distintos.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, aos quais se acrescentam as referências bibliográficas e os anexos.

Num primeiro capítulo é apresentada a problemática e enquadramento do tema, são descritos os objetivos do trabalho bem como a justificação para a comunidade científica. Por fim, apresenta-se a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 apresenta-se uma análise ao estado do conhecimento sobre o tema, no final do capítulo, apresenta-se também uma recolha bibliográfica de estudos anteriores que incidiram nas características de argamassas térmicas, algumas semelhantes à argamassa em estudo nesta dissertação.

No capítulo 3 descreve-se todo o trabalho experimental realizado. São descritos os materiais utilizados, os diferentes provetes produzidos e todas as metodologias dos ensaios a que se destinam.

No capítulo 4 apresentam-se os resultados obtidos para os diferentes ensaios efetuados, é realizada uma discussão, análise crítica e comparação dos resultados obtidos pelos diferentes métodos para a determinação do coeficiente de transmissão térmica.

No capítulo 5 apresentam-se as conclusões retiradas dos resultados obtidos com esta campanha e sugerem-se propostas para estudos futuros sobre o tema no sentido de complementar os resultados obtidos.

Por fim, apresentam-se as referências bibliográficas consultadas neste estudo e os anexos.

2 ARGAMASSAS DE DESEMPENHO TÉRMICO MELHORADO

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo apresenta-se a temática, identificam-se as opções de reabilitação térmica de fachadas mais correntes e depois incide-se nas argamassas de revestimento que é o foco principal do presente trabalho. Faz-se um breve enquadramento histórico e apresenta-se a legislação em vigor para as argamassas térmicas. Neste capítulo são também identificados os vários métodos de medição do coeficiente de condutibilidade térmica e, por fim, apresentam-se os resultados de estudos anteriores realizados por outros autores nesta temática.

2.2 ENQUADRAMENTO

Hoje em dia os edifícios são responsáveis por um terço do consumo de energia a nível mundial, isto deve-se ao crescimento da população e às necessidades de conforto dos espaços interiores (Kheradmand *et al.*, 2016).

Atualmente encontra-se em vigor a Diretiva nº 2010/31/EU, de 19 de Maio que foi transposta para o âmbito nacional pelo Decreto de Lei nº 118/2013, de 20 de Agosto, onde está inserido o Sistema de Certificação Energética dos Edifícios (SCE), o Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação (REH) e o Regulamento do Desempenho Energético dos Edifícios de Comércio e Serviços (RECS). A legislação atual não é aplicável a edifícios antigos, aplica-se apenas a edifícios novos ou a edifícios que tenham sido sujeitos a uma grande intervenção. Estão excluídos desta legislação monumentos e edifícios aos quais foi atribuído grande valor arquitetónico. Por grande intervenção define-se uma intervenção cujo custo da obra seja superior a 25% do valor total do edifício, como definido no artigo 2 do mesmo decreto de lei [W7].

Um dos objetivos estipulados pela União Europeia para 2020 passa pela construção de novos edifícios cujas necessidades de energia sejam nulas. Tal objetivo aplicar-se-á a partir de 2018, para o caso de edifícios públicos. Estas necessidades energéticas são determinadas pelo balanço entre os consumos de energia do edifício e o abastecimento de energia proveniente de fontes renováveis, ou seja, o objetivo é ter edifícios em que o

consumo energético seja na totalidade feito a partir de energias renováveis [W7]. Para o cumprimento deste objectivo deve-se melhorar a eficiência energética, onde se enquadra a aplicação de soluções construtivas da envolvente com melhor desempenho térmico, e utilizar sistemas de aproveitamento de energias renováveis.

2.3 SISTEMAS DE DESEMPENHO TÉRMICO MELHORADO

As soluções frequentemente encontradas para melhorar termicamente a fachada dos edifícios são os sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior (ETICS), os sistemas de colocação de placas de isolamento em fachadas aplicadas diretamente no suporte, sistemas de fachada ventilada com isolamento térmico, sistemas de colocação de isolantes no interior da caixa de ar de paredes duplas, e argamassas exteriores de desempenho térmico melhorado (Corrêa, 2016).

Os sistemas ETICS são constituídos por diferentes camadas, sendo geralmente fixados mecanicamente ao suporte. Atualmente existem vários fabricantes, mas todos com sistemas semelhantes. Na Figura 2.1 ilustra-se o esquema exemplo de um fabricante.

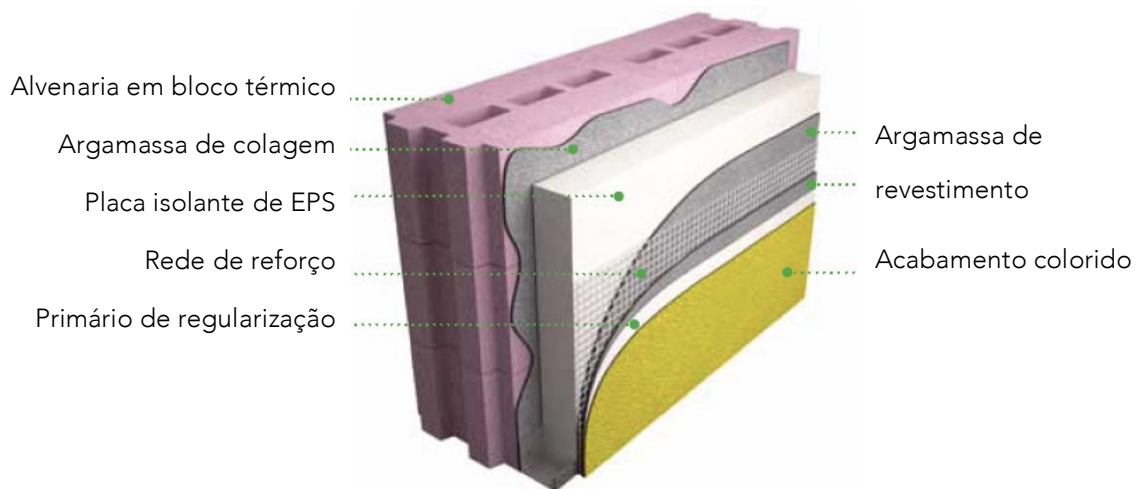


Figura 2.1: Sistema de ETICS clássico [W5]

As vantagens destes sistemas passam pela redução das pontes térmicas, melhor impermeabilização, uma vez que o sistema é estanque, maior economia energética e capacidade de acompanhar os movimentos do edifício. Outra vantagem passa pela redução da espessura das paredes exteriores dos edifícios, uma vez que com este sistema dispensa-se a parede dupla, o que conseqüentemente aumenta a área útil habitável e reduz das cargas permanentes da estrutura. Ao nível da aplicação tem também a grande

vantagem de poder ser aplicado sem a perturbação dos ocupantes (Freitas *et al.*, 2005). No entanto, para a aplicação destes sistemas no âmbito da reabilitação de edifícios antigos, é necessário verificar a coesão da parede podendo, em alguns casos, ser necessário aplicar um consolidante (APFAC, 2014).

O sistema de fachada ventilada constitui um sistema de isolamento térmico pelo exterior, caracterizado por ter uma caixa-de-ar ventilada a separar o revestimento exterior do suporte. O isolamento térmico é fixado ao paramento exterior da parede e, de seguida no sentido do interior para o exterior, encontra-se a caixa-de-ar ventilada e, por fim, o revestimento exterior apoiado numa estrutura metálica com aberturas na base e na parte superior (Aneli *et al.*, 2016).

A escolha por utilização de isolamentos térmicos no interior de paredes duplas divide-se em duas aplicações. No caso de construção nova são aplicados painéis de isolamento junto ao pano interior, no caso de obras de reabilitação térmica de edifícios já construídos isso já não é possível, optando-se pelo enchimento da caixa-de-ar com materiais isolantes como granulados ou espumas. A injeção pode ser feita pelo interior ou pelo exterior, através da realização de orifícios por onde se coloca o material e, por fim, é só colmatar esses espaços com um pouco de argamassa (Corrêa, 2016).

Nas argamassas de desempenho térmico melhorado, ocorre a substituição dos agregados correntes por agregados leves ou pela introdução de materiais avançados como, por exemplo, os materiais de mudança de fase (PCM- *phase change materials*) e os aerogéis. Os PCM são materiais que, quando expostos a temperaturas superiores ao seu ponto de fusão, passam ao estado líquido armazenando a energia que depois libertam lentamente quando expostos a temperaturas mais baixas do que o seu ponto de solidificação. A incorporação destes materiais faz com que se altere o pico do consumo de energia das zonas de tarifário de pico ("peak") para vazio ("off-peak") (Kheradmand *et al.*, 2016). As argamassas com incorporação de aerogéis são descritas mais pormenorizadamente no capítulo 2.8..

2.4 ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

2.4.1 Enquadramento histórico

Até à segunda metade do século XIX utilizavam-se as argamassas à base de cal aérea, tendo sido nesta altura que a cal como elemento ligante começou a ser substituída pelo cimento de Portland. Algumas desvantagens das argamassas de cal como o longo tempo de cura, as fracas propriedades mecânicas e a baixa coesão interna levaram e promoveram esta substituição (Oliveira *et al.*, 2012).

No entanto, as argamassas unicamente à base de cimento apresentam inúmeros pontos negativos quando aplicados no âmbito da reabilitação de edifícios existentes, em particular nos mais antigos, por serem mais compactas, mais rígidas e mais impermeáveis. Destaca-se que uma argamassa de revestimento deve ser mais permeável ao vapor de água do que o suporte/parede para que a água consiga evaporar antes de chegar à estrutura. As argamassas de revestimento devem ser também deformáveis e menos resistentes do que o suporte para que possam absorver pequenos movimentos do suporte (Oliveira *et al.*, 2012).

A utilização de argamassas unicamente de cimento em obras de reabilitação revelou-se inadequada e incompatível com o suporte. Tal deve-se, em parte, à elevada rigidez da argamassa de cimento que faz com que esta não consiga acompanhar os movimentos do suporte, gerando-se tensões internas que têm como consequência a fendilhação do revestimento. Outras anomalias que frequentemente surgem são o aparecimento de eflorescências e a aceleração da evolução do estado de degradação (Corrêa, 2016).

Por todas estas incompatibilidades surgiram novamente o interesse e estudo pela aplicação de cal na construção, para fazer face à necessidade de existirem no mercado argamassas compatíveis com a reabilitação de edifícios antigos.

As argamassas de revestimento podem-se classificar como tradicionais ou industriais, podendo as industriais ser pré-doseadas quando são doseadas em fábrica e misturadas em obra, ou pré-misturadas quando são doseadas e misturadas em fábrica e apenas é necessário misturar água em obra (Flores-Colen, 2009). As argamassas industriais apresentam inúmeras vantagens face às argamassas tradicionais, uma vez que passam por um controlo no processo de doseamento e mistura, têm uma constituição de matérias-

primas com maior controlo de qualidade, diminuem a possibilidade de erros humanos na produção e conferem uma melhor organização de estaleiro (Melo, 2014).

2.4.2 Funções e desempenho das argamassas de revestimento

Os revestimentos exteriores das paredes são a primeira barreira contra os agentes de agressão. Uma argamassa de revestimento tem como principais funções: a proteção das paredes, a impermeabilização e resistência à água, o acabamento das paredes como componente estética e a durabilidade para ações de manutenção correntes. Estas são normalmente constituídas por ligante, agregados, água, adições e adjuvantes (Flores-Colen, 2014; Brás *et al.*, 2013). No entanto apesar destas funções as argamassas de revestimento podem também desempenhar a função de isolamento térmico, contribuindo para a resistência térmica das paredes exteriores dos edifícios como é o caso de algumas argamassas apresentadas neste estudo.

O seu desempenho depende essencialmente do comportamento mecânico e físico, comportamento à água, comportamento térmico e acústico, manutenção do aspeto estético e purificação do ar exterior (Flores-Colen, 2014).

2.5 ARGAMASSAS TÉRMICAS

Argamassas térmicas são argamassas definidas pela norma EN 998-1 (2010) como argamassas com condutibilidades térmicas inferiores a 0,2 W/m.K pertencendo à classe T2, podendo ainda ser definidas pela classe 1 quando têm valores inferiores a 0,1 W/m.K.

A introdução de agregados leves faz melhorar o comportamento térmico das argamassas, diminuindo o coeficiente de condutibilidade térmica dos materiais, esta propriedade é ainda mais evidente quando o agregado é o aerogel de sílica (Soares *et al.*, 2012). Isto deve-se em grande parte ao fato de os agregados leves serem materiais mais porosos e com densidades mais baixas, pelas normas EN 13055-1 e NP EM 206-1 são considerados agregados leves materiais com baridade inferior a 1200kg/m³. No entanto, também se verifica que estas argamassas apresentam uma resistência à compressão mais baixa, o que pode pôr em causa o seu bom desempenho (Soares *et al.*, 2014). Como referido, um dos objetivos das argamassas térmicas é concorrer com outras soluções de isolamento

existentes no mercado, sendo uma das principais vantagens desta solução o facto da argamassa ter capacidade de se adaptar a diferentes geometrias do suporte.

Barbero *et al.* (2014) realizaram uma análise comparativa a várias argamassas térmicas presentes no mercado europeu, onde avaliaram as características de massa volúmica aparente, coeficiente de condutibilidade térmica e preço por metro quadrado. Foi analisado um total de 31 argamassas térmicas de 14 empresas diferentes. Verificou-se que a massa volúmica e a condutibilidade térmica apresentam uma relação de proporcionalidade direta, ou seja, que as amostras com menores massas volúmicas são aquelas que apresentam também menor condutibilidade térmica. Relativamente aos custos, verificou-se que, em média, as argamassas à base de cal hidráulica natural apresentam um custo cerca de duas vezes maior do que as argamassas à base de cimento, tendo sido obtidos valores de 82€/m² e 43€/m², respetivamente. Estes valores foram obtidos para cada argamassa, considerando espessuras diferentes de maneira a obter a mesma resistência térmica final (R_x) de 1 m²K/W. Neste estudo concluiu-se também que argamassas com incorporação de aerogel apresentam um bom desempenho térmico com espessuras mais baixas. Deixam também a indicação de que as novas argamassas térmicas a entrarem no mercado deveram apresentar massa volúmica inferior a 250 kg/m³ e custos entre 45 e 60€/m².

No âmbito do projeto Nanorender realizado no Instituto Superior Técnico, Melo (2014) estudou quatro argamassas industriais e três tradicionais, das quais se podem destacar duas com maior relevância para este estudo. A argamassa industrial à base de cal e cimento com 100% em volume de EPS como agregado, para a qual obteve um valor de condutibilidade térmica de 0,06 W/m.K e de massa volúmica de 237 kg/m³. E a argamassa também industrial com ligantes cal, cimento e ligantes sintéticos com 70 – 80 % em volume de EPS como agregado, para a qual se obtiveram valores de condutibilidade térmica de 0,11 W/m.K e de 432 kg/m³ para a massa volúmica. Os valores de massa volúmica são referentes ao estado endurecido em condições de humidade em equilíbrio com o meio envolvente. Neste estudo, são indicadas as temperaturas para as quais foram realizados os ensaios, e o teor em água apesar de não ser feita referência a conversões dos resultados em função destas grandezas. Os ensaios para o coeficiente de condutibilidade térmica foram realizados com o recurso a dois métodos diferentes (um estacionário e outro transiente), questão abordada com maior detalhe em 2.7.3..

Na Tabela 2.1 apresentam-se um resumo das características de argamassas industriais com propriedades térmicas presentes no mercado europeu.

Tabela 2.1: Tabela resumo das características de argamassas industriais

Autor	Ligante	Material	%	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)
Gonçalves et al. (2012)	Cimento Portland Branco	EPS	70 - 80	250	0,069
Frade et al. (2012)	Cimento	Cortiça	70 - 80	910	0,163
Melo (2014)	Cal e Cimento	EPS	100	237	0,060
	Cal, Cimento e ligantes sintéticos	EPS	70 - 80	432	0,110

Legenda: ρ - massa volúmica aparente; λ - coeficiente de condutibilidade térmica

Gonçalves et al. (2012) desenvolveram uma argamassa industrial de ligante cimento *Portland* branco com substituição de areia por EPS nas quantidades de 70-80% em volume e obtiveram um produto final com uma condutibilidade térmica de 0,069 W/m.K com massa volúmica de 250 kg/m³, sendo que este valor foi declarado a 10°C.

Frade et al. (2012) estudaram uma argamassa industrial à base de cimento com substituição do agregado areia por granulado de cortiça, e obtiveram para a condutibilidade térmica 0,163 W/m.K e massa volúmica aparente de 910 kg/m³.

2.5.1 Constituintes das argamassas térmicas

2.5.1.1 Ligantes

Atualmente os ligantes mais utilizados são a cal e o cimento, mas é possível encontrar outros como o gesso ou até a argila no caso de construções mais antigas (Faria, 2012). Os ligantes mais utilizados dividem-se em dois grupos: os hidráulicos e os aéreos.

O cimento mais utilizado é o cimento tipo *Portland*, este é produzido através de marga calcária a cerca de 1300 – 1500°C. No entanto, existem também outros tipos de cimento, tais como o cimento branco e o cimento pozolânico, este último em que uma parte de clínquer é substituída por pozolanas (Faria, 2012).

As cais podem ser aéreas ou hidráulicas, as primeiras dividem-se em cais cálcicas ou dolomíticas e as segundas em cais hidráulicas, cais hidráulicas naturais ou cais formuladas. As cais aéreas e as cais hidráulicas naturais são produzidas pela cozedura, a cerca de 900°C, de rochas calcárias sem adições. As cais aéreas utilizam apenas calcários puros ou magnesianos e as cais hidráulicas naturais utilizam calcários com alguma percentagem de argila. Já as cais hidráulicas e as cais formuladas utilizam ambas algumas adições como gesso, fílers ou clínquer e são produzidas a temperaturas superiores (Faria, 2012).

No contexto da preocupação da redução das emissões de CO₂ surge o interesse na construção, pela utilização de produtos mais amigos do ambiente. Neste sentido, a cal como material está em vantagem em relação ao cimento uma vez que para a produção do cimento é necessário mais energia devido às altas temperaturas e aos processos de moagem necessários (Faria, 2012).

Uma conclusão transversal a alguns estudos anteriores realizados para avaliar as características de argamassas de cal e cimento (Fourmentin *et al.*, 2015; Arandigoyen *et al.*, 2006) consiste no facto de a presença da cal acelerar o processo de cura da argamassa, sendo que quanto maior for a sua quantidade maior a velocidade do processo. Um destes estudos adianta ainda que este fenómeno tem um limite a partir do qual a quantidade de cal deixa de influenciar a velocidade de cura, e estima que esse limite ocorra para o valor de 30% de cal na mistura (Fourmentin *et al.*, 2015).

No estudo realizado por Arandigoyen *et al.* (2007) é revelado que a resistência mecânica baixa acentuadamente ao se adicionar uma pequena percentagem de cal a uma argamassa de cimento, e que, no entanto, a adição de uma quantidade relativa de cimento a uma argamassa de cal apenas aumenta ligeiramente a sua resistência mecânica.

A cal aérea aumenta a porosidade das argamassas e, por isso, diminui a sua densidade o que, por sua vez, faz diminuir o coeficiente de condutibilidade térmica das mesmas. Enquanto a cal faz baixar a condutibilidade térmica das argamassas o cimento aumenta as suas propriedades mecânicas (Torres *et al.*, 2009).

Ximenes *et al.* (2016) avaliaram a influência de diferentes componentes no comportamento térmico e mecânico de argamassas com aerogel e concluíram que uma das variáveis que mais influenciava o comportamento térmico das argamassas é a cal aérea.

O interesse no estudo das argamassas de cal e cimento é o melhoramento de uma e de outra, tentando eliminar as desvantagens tanto das argamassas de cal como das de cimento, muitas argamassas térmicas industriais apostam na mistura de estes dois ligantes. Com o objetivo de assim de conseguir obter um material mais competitivo com as outras soluções de isolamento presentes no mercado.

2.5.1.2 Agregados leves

Encontram-se como agregados leves em argamassas térmicas o aerogel de sílica, o poliestireno expandido, a cortiça e a argila expandida. A cortiça como material tem um interesse especial no contexto de Portugal, por ser um produto nacional, sendo importante uma escolha responsável dos materiais a utilizar. A opção pela introdução de materiais nacionais traz vantagens não só sociais como também económicas. De seguida, apresentam-se os agregados utilizados no âmbito deste estudo, o poliestireno expandido e o aerogel.

2.5.1.3 Poliestireno expandido

As características do poliestireno expandido (EPS) consistem na baixa massa volúmica, na ordem dos 10 – 30 kg/m³, uma elevada resistência mecânica face à sua massa volúmica, um baixo coeficiente de condutibilidade térmica na ordem dos 0,035 W/m.K, baixa absorção de água e ainda ótima compatibilidade com quase todos os materiais de construção [W8]. É considerado um material leve e com boas características térmicas, no entanto tem como desvantagem o fato ser um material inflamável, ou seja, com pior comportamento ao fogo, o que pode em alguns casos limitar a sua utilização (EUMEPS, 2014). Apresenta-se geralmente de cor branca, em grânulos ou placas, podendo adaptar-se a diversas formas. Na Figura 2.2 é possível observar este material na forma granulado.

O EPS é um material que quando introduzido em argamassas, como substituição de agregados correntes, provoca a diminuição da resistência mecânica bem como da massa volúmica (Leal, 2012) e também da condutibilidade térmica.

O poliestireno expandido (EPS) obtém-se por processos físicos de expansão do poliestireno (PS). O método de produção divide-se em três fases distintas, pré-expansão, armazenamento intermédio e moldagem [W6].



Figura 2.2: Poliestireno expandido em granulado [W6]

A pré-expansão consiste na exposição do poliestireno a vapor de água a uma temperatura de 80°C a 100°C, condições para as quais o elemento expansor faz expandir o poliestireno em cerca de 50 vezes o seu volume, obtendo-se um granulado de partículas constituídas por pequenas células. De seguida, é colocado no armazenamento intermédio onde arrefece, criando uma dispersão no interior das células que é preenchida por ar, estabilizando. A terceira e última fase são facultativas, e se o produto for para ficar em granulado esta já não ocorre. Se se pretender que o produto tenha uma forma específica esta fase consiste na colocação do granulado nos moldes desejados e a sua exposição novamente ao vapor de água. Este processo faz com que os grânulos se liguem entre si, obtendo-se um produto final coeso e com boa resistência.

2.5.1.4 Aerogel de sílica

Um nanomaterial ou uma nanoestrutura é um material que pode ser estudado à escala nanométrica (0,1 a 100 nm) e o aerogel pela forma única e tamanho reduzido dos seus poros, na ordem dos 10 a 100 nm, é considerado um nanomaterial (Gonçalves, 2012) citado por (Flores-Colen *et al.*, 2014).

Os aerogéis resultam da secagem/desidratação de geles com elevada porosidade, tendo sido descobertos por Kistler no início dos anos 30 (Baetens *et al.*, 2011). Este material é inorgânico e altamente poroso e, por isso, muito leve, com uma densidade inferior a 500 kg/m³. O aerogel de sílica apresenta excelentes propriedades enquanto isolante térmico, com condutibilidade térmica entre 0,01 e 0,02 W/m.K, e enquanto isolante acústico, com impedância acústica entre 103 e 106 kg/m².s. O que faz com que seja um material em conformidade com as atuais exigências de poupança de energia e de redução de ruído [(Zhu *et al.*, 2004), (Aegerter *et al.*, 2011) citado por (Flores-Colen *et al.*, 2013)].

O fato de ser não reativo e incombustível é uma grande vantagem quando comparado com os isolamentos térmicos convencionais, como o EPS, XPS ou o poliuretano que emitem fumos tóxicos ao arderem (Oliveira *et al.*, 2012), e por isso representam um melhor comportamento ao fogo para casos de incêndio.

O aerogel apresenta um elevado custo de produção, no entanto quando comparado com outros agregados leves é o que apresenta melhor desempenho térmico e por isso representa uma maior poupança de energia necessária para fazer face às perdas de calor da envolvente. De modo a que se possa comparar com os restantes agregados leves é necessário ter em conta estes dois custos e estimar o tempo de retorno do investimento, *payback period*. Huang (2012) estudou estas variáveis e estimou que o tempo de retorno do aerogel é de 3,54 anos enquanto que para o EPS é de 0,22 anos e para o XPS de 0,07 anos.

Segundo Koebel *et al.* (2012) o custo do aerogel é 20 vezes superior aos outros isolantes habitualmente utilizados na construção, no entanto, este custo tão elevado pode ser diminuído uma vez que este material tem um menor custo de aplicação, apresenta maior longevidade, maior resistência química e a sua utilização pode ainda ser justificada por permitir um maior aproveitamento das áreas.

O método de produção do aerogel de sílica pode ser dividido em 3 passos, preparação de gel, envelhecimento e secagem supercrítica ou subcrítica (Júlio *et al.*, 2015).

2.5.2 Outras aplicações do aerogel como material isolante

Atualmente dois tipos diferentes de aerogel são utilizados no setor da construção, os *Opaque Silica Aerogel-Based Materials* e os *Translucent Silica Aerogel-Based Materials*. Os primeiros são mantas opacas que podem ser utilizadas nas paredes pelo interior ou pelo exterior, em telhados ou em chãos. Os segundos são materiais que combinam a muito baixa condutibilidade térmica com uma elevada transmissão de energia solar e luz, estes destinam-se normalmente à utilização em envidraçados por serem materiais translúcidos (Ibrahim, 2015).

A Aspen Aerogels Inc tem desenvolvido uma manta opaca à base de aerogel de sílica, o *spaceloft*, que apresenta um coeficiente de condutibilidade térmica de 0,0131 W/m.K. Alguns estudos têm sido feitos com este material, entre eles um moinho na Suíça que foi

revestido com mantas de *spaceloft* de 9mm de espessura pelo interior e exterior das paredes e pelo interior do chão. Neste estudo obteve-se um decréscimo do coeficiente de transmissão térmica das paredes (U) de 1 para 0,2 W/m.K². Na Figura 2.3 é possível observar este material à esquerda, Figura 2.3 a) em cor cinza e à direita, Figura 2.3b) em cor branca.

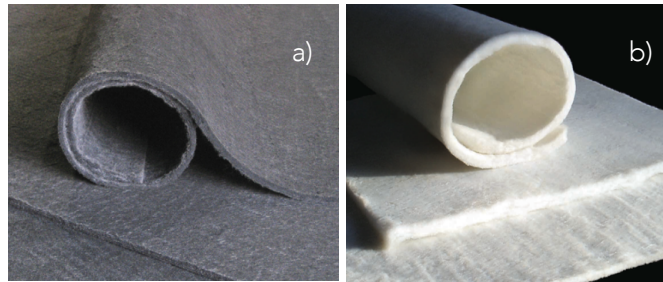


Figura 2.3: Duas mantas de *spaceloft* em cor branca e cinza (Aspen Aerogels).

Um outro estudo realizado em Inglaterra em edifícios governamentais aplicou uma camada de *spaceloft* pelo interior das paredes e obteve resultados com uma redução do coeficiente de transmissão térmica (U) em 44%, uma poupança energética de 900KWh/ano e ainda uma redução das emissões de carbono de 400kg/ano. Este material tem ainda a vantagem de atuar nas pontes térmicas, diminuindo consideravelmente as perdas de calor nestes locais.

Na Universidade de Nottingham também foi realizado um trabalho experimental com recurso a mantas à base de aerogel, no qual as paredes exteriores de um quarto em estudo foram revestidas pelo interior por uma camada de 2 cm de espessura. O valor de U da parede inicial era de 0,55 W/m.K² e depois de revestida pela manta de aerogel passou a ser 0,30 W/m.K², tendo-se observado uma redução de 46% nas perdas de calor (Cuce et al., 2014).

Na última década têm-se vindo a desenvolver vários estudos sobre a introdução de aerogéis em envidraçados, estes podem ser na forma de granulado (Figura 2.4 a)) ou de placa (Figura 2.4 b)).

Em Perugia, Itália, foi realizado um outro estudo em envidraçados com granulado de aerogel de sílica, onde foram analisadas e comparadas duas janelas de vidro duplo orientadas a sul, uma com ar entre os dois vidros e outra com granulado de aerogel de sílica. Os valores do coeficiente de transmissão térmica obtidos foram de 1,5 W/m.K² para a janela de referência e 1 W/m.K² para a janela com aerogel. Este estudo concluiu ainda

que a utilização de aerogel entre os vidros conduz a uma redução até 50% no consumo de energia e que devido à elevada transparência deste material a luminosidade reduz apenas 10% da iluminância interior, em média, num dia de sol (Cotana *et al.*, 2014).

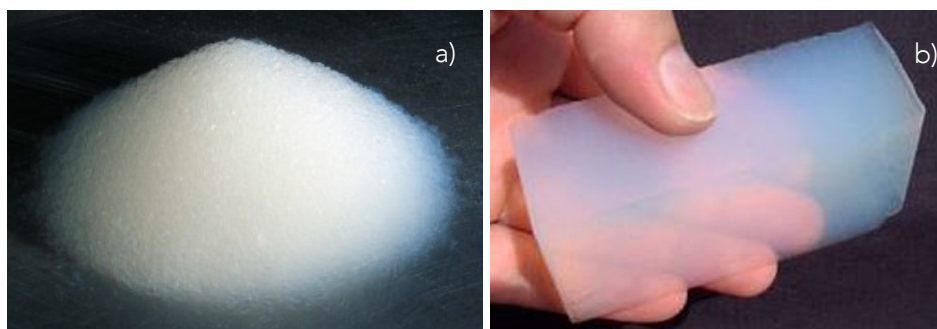


Figura 2.4: Aerogels em granulado [W1] e em placa [W2].

A empresa alemã ZAE Bayern, desenvolveu um sistema de envidraçados com uma camada central de 16 mm de granulados de aerogel de sílica. Realizou testes para dois tipos de granulados, um translúcido e outro semi-translúcido, e obteve valores para o coeficiente de transmissão térmica mais baixos para os envidraçados com o granulado semi-translúcido. Foram estudados dois sistemas diferentes, tendo-se obtido resultados de U entre 0,44 e 0,56 $W/m.K^2$ e transmissão solar entre 0,33 e 0,45 para um dos sistemas e valores de U entre 0,37 e 0,47 $W/m.K^2$ e de transmissão solar entre 0,17 e 0,23 para o outro (Reim *et al.*, 2002).

Jensen *et al.* (2004) estudaram envidraçados com a utilização de aerogel monolítico, e obtiveram um coeficiente de transmissão térmica de 0,66 $W/m.K^2$ com uma transmissão solar de 0,85 usando uma espessura de aerogel de 13,5 mm, o que representa uma poupança de energia de 19% quando comparada esta solução com um envidraçado triplo preenchido com argon. Este valor foi ainda mais elevado (34%) para uma espessura de 20 mm.

Buratti e Moretti (2012) estudaram envidraçados com aerogel monolítico e granulado e concluíram que os sistemas com aerogel monolítico têm melhor performance ao nível da transmissão de luz e da transmissão térmica, tendo-se obtido os valores de 0,62 e 0,6 $W/m.K^2$ respetivamente. Além destes resultados o sistema de aerogel monolítico entre dois vidros de 4 mm obteve uma redução de perdas de calor de 62% quando comparado com um vidro duplo convencional.

2.5.3 Exigências normativas

As exigências normativas para as argamassas térmicas, segundo a norma EN 998-1 (2010), são resistência à compressão das classes CS I a CS II; absorção de água por capilaridade da classe W1; permeabilidade ao vapor de água (μ) $\leq 0,15$; e coeficiente de condutibilidade térmica das classes T1 a T2. A Tabela 2.2 sintetiza estas características.

Tabela 2.2: Tabela das exigências das argamassas térmicas segundo a norma EN 998-1 (2010)

Característica	Classe	Valores
Resistência à compressão	CS I	0,4 – 2,5 N/mm ²
	CS II	1,5 – 5 N/mm ²
Absorção de água por capilaridade	W1	$c \leq 0,4 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{min}^{0,5}$
Permeabilidade ao vapor de água (μ)		$\leq 0,15$
Coeficiente de condutibilidade térmica (λ)	T1	$\leq 0,1 \text{ W/m.K}$
	T2	$\leq 0,2 \text{ W/m.K}$

2.5.4 Medição do coeficiente de condutibilidade térmica

O coeficiente de condutibilidade térmica é a grandeza declarada pelos fabricantes de argamassas térmicas para classificar o seu comportamento térmico. Esta grandeza pode ser declarada para diferentes condições de temperatura e teor de água e existem diferentes métodos para a sua medição. Uma vez que se está a medir valores de gamas baixas e devido à crescente competitividade dos revestimentos térmicos surge a necessidade de uma maior precisão na medição do valor do coeficiente de condutibilidade térmica (λ) e, por isso, surge o interesse de comparar diferentes métodos de medição.

A transmissão de calor ocorre de três maneiras, por condução, convecção e radiação. O coeficiente de condutibilidade térmica é a propriedade do material que caracteriza a maior ou menor facilidade de transferência de calor por condução e depende não só da densidade, mas também da dimensão dos poros e do tipo de estrutura interna. O aerogel de sílica apresenta uma estrutura e distribuição de mesoporos única que lhe permite uma transmissão por convecção reduzida, e poros de dimensão micro que lhe permite uma reduzida transmissão por condução. São estas características que fazem com que as

argamassas com aerogel de sílica apresentem valores bastante reduzidos de condutibilidade térmica (Gomes *et al.*, 2017).

Como este valor varia conforme as condições para as quais é determinado, para se poder comparar valores de condutibilidade térmica de forma correta é necessário fazer a conversão de todos os valores obtidos em laboratório para uma mesma condição definida pela norma ISO 10456 (2007).

Existem vários métodos de medição do coeficiente de condutibilidade térmica, estes podem-se dividir em dois grupos: métodos estacionários; e métodos transientes.

i) Métodos estacionários

Os métodos estacionários consistem na fixação de um gradiente de temperatura estacionário numa amostra de espessura conhecida e medição do fluxo de calor. O coeficiente de condutibilidade térmica é calculado através da Lei de Fourier unidirecional. Estes métodos estacionários têm como principais desvantagens o tempo que demoram a atingir um fluxo estacionário o que leva a longas durações de ensaio, os elevados gradientes de temperatura necessários e a necessidade de utilização de uma amostra de calibração. Destes o mais conhecido e utilizado é o *Guarded Hot Plate* (GHP), mais adequado para materiais isolantes, com condutibilidades mais baixas. No entanto, a maior parte dos métodos estacionários utiliza um sistema sandwich em que as amostras são colocadas entre duas placas, com temperaturas diferentes as quais se designam por placa quente e placa fria, método designado por *Heat Flow Meter* (HFM) (Franco, 2007). Na Figura 2.5 encontram-se representados estes dois métodos, na Figura 2.5 a) o esquema do método *Guarded Hot Plate* (GHP) e na Figura 2.5 b) o do método *Heat Flow Meter* (HFM).

Um outro método que utiliza condições estacionárias para calcular o coeficiente de condutibilidade térmica é o Disco de Lee. Apesar de haver pouca informação sobre este método, sabe-se que resultou do trabalho de Lee e Charlton e que foi pela primeira vez mencionado no universo científico em 1896.

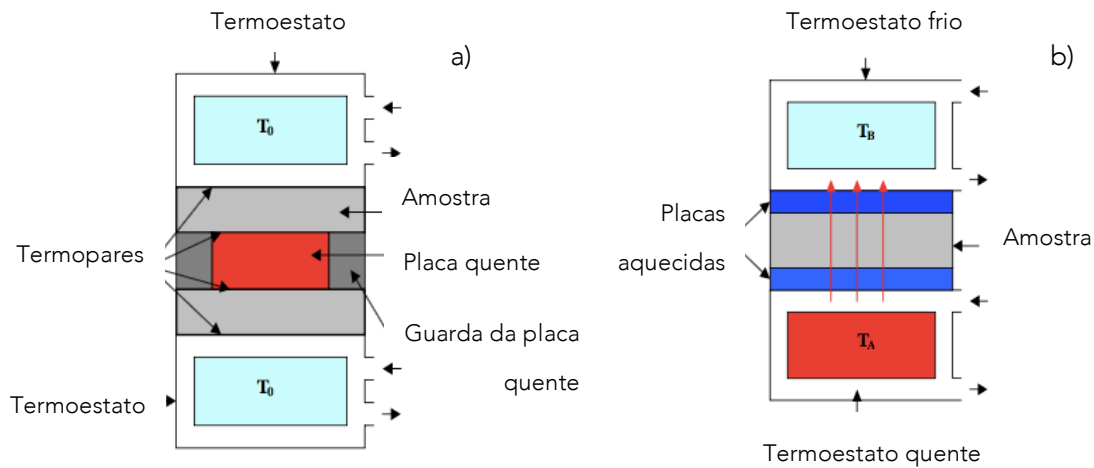


Figura 2.5: Representação esquemática dos métodos estacionários, a) Guarded Hot Plate e b) Heat Flow Meter (adaptado de Franco, 2007)

Este método realiza-se em duas fases, uma primeira fase em que a amostra é colocada entre duas placas de cobre e o sistema é aquecido até atingir o estado estacionário, e uma segunda fase, em que um dos discos é retirado e o outro é deixado a arrefecer em contacto com a amostra enquanto são registados os seus valores de temperatura ao longo do tempo. Mais detalhes sobre a aplicação deste método podem ser encontrados no capítulo 3.6.2.2.. Na Figura 2.6 apresenta-se a representação esquemática deste método Figura 2.6 a) fase 1 e Figura 2.6 b) fase 2 [(Fidalgo et al., 2013), [W10]].

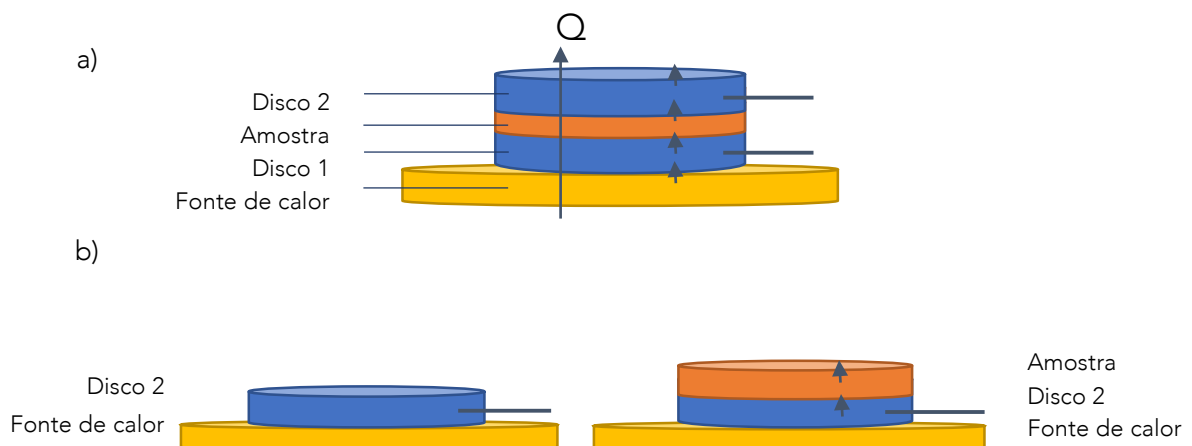


Figura 2.6: Esquema ensaio Disco de Lee a) fase 1 b) fase 2

A maior parte dos métodos estacionários têm ainda a desvantagem do elevado consumo de recursos, energia elétrica e água, uma vez que estes equipamentos têm que estar

simultaneamente ligados à corrente e a um sistema de refrigeração de água a correr durante todo o ensaio.

ii) Métodos transientes

Os métodos transientes são métodos dinâmicos, ou seja, não estacionários. Normalmente medem a resposta a um impulso de calor por aquecimento elétrico enviado pelo respetivo equipamento à amostra. O coeficiente de condutibilidade térmica é calculado através de modelos matemáticos com as diferentes temperaturas medidas em intervalos de tempo definidos. Estes métodos têm algumas vantagens como a curta duração dos ensaios e a dispensa de calibração antes de cada ensaio, no entanto, só podem ser realizados em amostras que estejam em equilíbrio com as condições ambiente de ensaio (Franco, 2007).

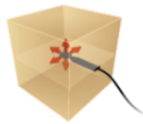


Figura 2.7: Método transiente de fonte plana (TPS) [W9]

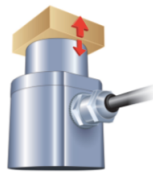


Figura 2.8: Método transiente modificado de fonte plana (MTPS) [W9]



Figura 2.9: Método transiente de fonte linear (TLS) [W9]

Nas figuras acima são apresentados alguns destes métodos, nomeadamente, na Figura 2.7 o método de fonte plana (*transient plane source* – TPS), na Figura 2.8 o método modificado de fonte plana (*modified transient plane source* – MTPS) e na Figura 2.9 o método de fonte linear (*transient line source* - TLS) mas existem outros como o *HotWire*.

2.5.5 Estudos comparativos de diferentes métodos

Melo (2014) na medição do coeficiente de condutibilidade térmica utilizou dois equipamentos, o método transiente de fonte plana ISOMET 2114 (sonda de superfície) e o método estacionário de *Heat Flow Meter* (HFM) Rapid K, tendo obtido respetivamente 0,06 W/m.K e 0,10 W/m.K para uma das argamassas (com 100% de EPS) e 0,11 W/m.K e 0,14 W/m.K para uma outra (com 70-80% de EPS). Verifica-se que os resultados obtidos com o equipamento Rapid K são superiores, em 67%, aos obtidos pelo ISOMET. No entanto para outras argamassas industriais analisadas nesse estudo, com coeficientes de condutibilidade térmica mais altos, a diferença dos valores medidos pelos dois equipamentos foi consideravelmente menor, cerca de 7%. Para os resultados deste estudo

não são indicadas as temperaturas de ensaio bem como não é referido se foi realizada alguma conversão para esta característica. No entanto, para o teor de água são apresentados os respetivos valores.

Sousa (2017) obteve algumas medições para o coeficiente de transmissão térmica utilizando dois equipamentos o ISOMET, sonda de superfície e sonda de agulha, e um outro equipamento que segue o método *Heat Flow Meter para uma argamassa com EPS*. Obteve resultados ligeiramente superiores para o método *Heat Flow Meter* quando comparados com os obtidos pela sonda de agulha do equipamento ISOMET, estes foram 0,0235 W/m.K e 0,0230 W/m.K respetivamente. E obteve valores superiores para os ensaios em laboratório quando comparados com os valores declarados pelo fabricante, 0,0542 W/m.K e 0,042 W/m.K, respetivamente. Os ensaios com o equipamento foram realizados a $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e os ensaios pelo método *Heat Flow Meter* foram realizados a uma temperatura média de $47,5^{\circ}\text{C}$, neste estudo foi tido em conta o fator de correção da temperatura e os resultados apresentados são para uma temperatura de 23°C . Relativamente ao teor de água, neste estudo não foi medido nem tido em conta qualquer fator de correção para os resultados obtidos.

Na Tabela 2.3 apresentam-se os resultados obtidos em estudos anteriores realizados no IST no âmbito das argamassas térmicas industriais alguns em que foram utilizados mais do que um método para medir o coeficiente de condutibilidade térmica, apresentam-se também os valores declarados pelos fabricantes das respetivas argamassas, para que seja possível comparar os resultados obtidos com estes.

Tabela 2.3: Comparação entre métodos em outros estudos.

Autor	Valor declarado pelo fabricante	λ (W/m.K)	Método	Nome Equipamento
Melo (2014)	0,05	0,06	Transiente	ISOMET – Superfície
		0,10	Estacionário	Rapid K
	0,07	0,11	Transiente	ISOMET – Superfície
		0,14	Estacionário	Rapid K
Sousa (2017)	0,042	0,0542	Transiente	ISOMET – Superfície

Legenda: λ - coeficiente de condutibilidade térmica

2.6 ARGAMASSAS COM AEROGEL DE SÍLICA

O aerogel tem surgido no âmbito dos materiais muito leves e com boas características térmicas e por isso o interesse na avaliação do desempenho da sua integração em argamassas térmicas tem crescido. No entanto, ainda existem muitas questões por estudar no que diz respeito aos componentes a utilizar nestas argamassas para se obter um bom desempenho térmico e uma resistência mecânica aceitável (Ximenes *et al.*, 2016).

Estudos anteriores revelam que a introdução de agregados leves aumenta a porosidade aberta das argamassas que, no caso do aerogel de sílica, esta propriedade é ainda mais evidenciada obtendo-se aumentos na ordem dos 56%. Este facto pode ser justificado pela estrutura dos poros da argamassa se modificar quando introduzido este tipo de agregados. De facto, observa-se uma diminuição de microporos (dimensões inferiores a 0,1 μm) e, no caso do aerogel de sílica, este tipo de poros pode mesmo desaparecer (Soares *et al.*, 2014), (Gonçalves, 2007).

No mesmo estudo, revela-se que a argamassa com aerogel de sílica, quando comparada com outras argamassas com agregados leves e com a de referência do próprio estudo, apresenta uma maior absorção capilar, e também um menor índice de secagem. O que indica uma maior facilidade de secagem e melhor permeabilidade ao vapor de água, ou seja, os autores observaram um menor coeficiente de difusão ao vapor de água. Este facto pode também ser explicado pela diferente estrutura porosa destas argamassas, que têm maior fração de mesoporos (com dimensões entre 0,1 μm e 30 μm) (Soares *et al.*, 2014; Gonçalves, 2007).

Stahl *et al.* (2011) estudaram a incorporação de aerogel de sílica em argamassas de ligante mineral, sem cimento, para que fossem compatíveis com edifícios antigos. Adicionaram 60 a 90 % em volume de aerogel e obtiveram valores de condutibilidade térmica de $0,025 \pm 0,002 \text{ W/m.K}$ com massa volúmica de 200 kg/m^3 . Neste estudo foram utilizados provetes com as medidas $65 \times 65 \times 12 \text{ mm}^3$, ensaiados pelo método *Guarded Hot Plate*, para o estado seco. Neste estudo não é revelado qual a temperatura de ensaio ou qual a temperatura referente aos resultados obtidos, ou seja, não é indicado se foi realizada a conversão para as temperaturas indicadas na norma.

Kim *et al.* (2013) estudaram a incorporação de aerogel em argamassas de cimento, tendo adicionado diferentes percentagens de aerogel a duas argamassas, uma com pozolanas e

outra sem, e compararam os resultados obtidos para a condutibilidade térmica. A argamassa apenas com cimento obteve melhores resultados ainda que pouco diferentes dos da argamassa com cimento e pozolanas. Para a substituição de 2% de aerogel em massa obtiveram-se valores de condutibilidade térmica de 0,13 W/m.K o que representa um decréscimo de 75% e para a argamassa com cimento e pozolanas o valor foi de 72%. Neste estudo o coeficiente de condutibilidade térmica foi medido com o método *Modified Transient Plane Source*, no entanto, não é referido qual a temperatura para a qual se referem os resultados obtidos.

Achard *et al.* (2011) realizaram um estudo em argamassas destinadas a revestimento de paredes pelo exterior com a adição de aerogel, no qual foram obtidas densidades de 156 kg/m³ (para o estado endurecido seco) e valores de condutibilidade térmica de 0,0268 W/m.K. A condutibilidade verifica-se ser muito inferior às argamassas de revestimento tradicionais que têm valores entre 0,05 e 0,2 W/m.K. Neste estudo, os ensaios do coeficiente de condutibilidade térmica foram realizados com dois métodos estacionários, o *Guarded Hot Plate* e o *Heat Flow Meter*.

Na Tabela 2.4 apresenta o resumo das características de argamassas com aerogel de sílica de estudos anteriores.

Tabela 2.4: Tabela resumo de estudos feitos em argamassas com aerogel de sílica.

Autor	Ligante	%	ρ (kg/m ³)	λ (W/m.K)	Método
Sthal <i>et al.</i> (2011)	Mineral	60-90 (V)	200	0,025	<i>Guarded Hot Plate</i>
Kim <i>et al.</i> (2013)	Cimento	2 (M)	-	0,13	-
Achard <i>et al.</i> (2011)	-	-	156	0,0268	GHP e HFM
Sousa (2017)	Cal Cimento	119 (V)	123,79	0,0266	MTLS e HFM

Legenda: ρ - massa volúmica aparente; λ - coeficiente de condutibilidade térmica

Sousa (2017) estudou a introdução de aerogel em duas argamassas industriais, uma à base de cal e cimento com agregado EPS e outra com perlite. Este autor obteve para a introdução de 119% em volume de agregados de aerogel de sílica uma condutibilidade térmica de 0,0272 W/m.K com uma massa volúmica de 124,23 kg/m³ para a argamassa com EPS e uma condutibilidade térmica de 0,0266 W/m.K com uma massa volúmica de 123,79

kg/m³ para a argamassa com perlite. Os resultados obtidos para a condutibilidade térmica foram realizados com um equipamento de sonda de agulha que utiliza um método transiente, para a temperatura de 20°C e para a condição de estado seco.

2.7 SÍNTESE DE CAPÍTULO

Com o aumento dos níveis de conforto e conseqüente aumento do consumo de energia, a eficiência energética dos edifícios revela-se cada vez mais importante. A introdução de agregados leves como o aerogel de sílica nas argamassas de revestimento faz reduzir a condutibilidade térmica o que permite a obtenção de materiais com bons desempenhos térmicos, que competem com as outras soluções de desempenho térmico melhorado existentes no mercado, tendo a vantagem de se poder acomodar facilmente a qualquer geometria de suporte.

Neste capítulo concluiu-se que na maior parte dos estudos realizados em argamassas térmicas não são apresentadas muitas informações relativas aos às condições de ensaio e tratamento de resultados para obtenção do coeficiente de condutibilidade térmica. Informações como a temperatura de ensaio, o teor de água de ensaio, os métodos utilizados, o tratamento dos dados e eventuais correções aos mesmos são muitas vezes inexistentes. No entanto estas informações têm uma enorme relevância uma vez que influenciam os valores absolutos.

3 CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo descrevem-se os trabalhos experimentais realizados no laboratório, bem como os métodos de medição utilizados durante a campanha experimental.

A campanha experimental teve a duração de 160 dias e 4 fases, uma primeira fase de produção, uma segunda de medição do coeficiente de condutibilidade térmica aos 28 dias, a terceira fase consistiu na medição do coeficiente de condutibilidade térmica para o estado endurecido seco e a última fase foi a medição deste coeficiente para diferentes teores de água dos provetes.

Neste trabalho experimental foram utilizados um método transiente e dois métodos estacionários na medição deste coeficiente, utilizando cinco equipamentos diferentes, para o método transiente foi utilizado o equipamento *ISOMET*, em que foram ensaiadas duas sondas a de superfície e a de agulha. Para os métodos estacionários foram utilizados três equipamentos dois que seguem o método *Heat Flow Meter*, o *Rapid K* da Holometrix ao qual nesta dissertação se irá designar por *HFM1* e um equipamento desenvolvido pela Universidade de Aveiro pelo departamento de Engenharia de Materiais e Cerâmica ao qual se irá designar por *HFM2*, e um outro que segue o método *Disco de Lee*.

3.2 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS A ENSAIAR

3.2.1 Argamassa industrial com granulado de poliestireno expandido (A^{EPS})

A argamassa A^{EPS} é uma argamassa industrial de base mineral, com um desempenho térmico melhorado, desenvolvida e utilizada não só para construção nova como também para reabilitação. É fornecida em saco, com pó de cor amarela, tem como ligantes minerais a cal aérea e o cimento e cargas minerais e leves, sendo as cargas leves agregados de granulado de poliestireno expandido. É constituída também por adjuvantes reológicos, introdutores de ar, hidrófugos de massa e resina. Na Tabela 3.1 apresentam-se as características da argamassa ensaiada.

Tabela 3.1: Características da argamassa industrial A^{EPS} (WSG, 2017)

Características	Valores
Massa volúmica aparente em pó	140 ± 25 kg/m ³
Massa volúmica aparente no estado fresco	350 ± 75 kg/m ³
Massa volúmica aparente no estado endurecido	150 ± 50 kg/m ³
Condutibilidade térmica	0,042 W/m.K
Resistência à compressão	0,4 – 2,5 N/mm ²

3.2.2 Aerogel de sílica

Nesta campanha experimental foi utilizado o aerogel de sílica em forma de granulado (Figura 3.1) como agregado leve para conferir ao produto final uma massa volúmica mais baixa e melhores propriedades térmicas. O aerogel de sílica é um material amorfo, não reativo e incombustível, ou seja, tem boa reação ao fogo. É também um material de aspeto translúcido, hidrofóbico e no caso em estudo, obtido por secagem supercrítica. Na Tabela 3.2 apresentam-se as características deste material (ENERSENS, 2013).



Figura 3.1: Aerogel em granulado utilizado

Tabela 3.2: Características do Aerogel comercial utilizado (ENERSENS, 2013)

Caraterísticas	Descrição
Forma das partículas	Granulado
Dimensões das partículas	0,01 a 4 (mm)
Massa volúmica aparente	60 a 100 (Kg/m ³)
Diâmetro dos poros	8 a 25 (nm)
Condutibilidade térmica (λ)	0,018 a 0,020 W/m.K

3.3 COMPOSIÇÕES PRODUZIDAS A ENSAIAR

Nesta campanha experimental foram ensaiadas argamassas térmicas, com o objetivo de analisar a variabilidade dos resultados de condutibilidade térmica obtidos por diferentes métodos de medição.

Foram produzidas duas argamassas: i) uma argamassa térmica industrial A^{EPS} de referência sem aerogel adicionado; ii) e outra, A^{EPS+Ag} com a adição de aerogel de quantidade em massa igual à da argamassa industrial, ou seja, foi adicionado 100% de aerogel relativamente ao total da massa da mistura. As composições ensaiadas encontram-se indicadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Constituições das composições a ensaiar

Designação	Aerogel/ A^{EPS} (em massa)	A^{EPS} (g)	Aerogel (g)	Total (g)	Água (g)	A/Pó
A^{EPS}	0	500	0	500	550	1,10
A^{EPS+Ag}	1,00	100	100	200	370	1,85

A quantidade de água e conseqüentemente a relação água/pó (A/Pó) foi determinada durante a produção e tendo como critério a consistência e trabalhabilidade da pasta. Como se pode observar na Tabela 3.3 esta relação (A/Pó) foi superior para a argamassa com aerogel (A^{EPS+Ag}) como seria expectável uma vez que segue a tendência de outros estudos realizados à mesma argamassa como (Pedroso *et al.*, 2017).

3.4 PROVETES PRODUZIDOS

Nesta campanha experimental foram produzidos um total de 28 provetes, 3 de cada formulação para cada ensaio à exceção dos provetes para o ensaio com o método HFM1 com o equipamento *Rapid K* da argamassa A^{EPS+Ag} para o qual, foi apenas produzida uma placa de 30x30x27 mm³ de modo a reduzir as quantidades necessárias de aerogel. Na Tabela 3.4 encontram-se descritos os provetes a ensaiar.

Tabela 3.4: Descrição dos provetes a ensaiar

Ensaio / Provetes		Forma	Dimensões (mm)	Nº A ^{EPS}	Nº A ^{EPS+Ag}	Nº Total
ISOMET	Sonda Superfície	Cilíndrica	D=72 h=30	3	3	6
	Sonda Agulha	Cilíndrica	D=67 h=130	3	3	6
Disco de Lee		Cilíndrica	D=45 h=7	3	3	6
HFM1		Prismática	300x300x27	3	1	4
HFM2		Prismática	40x40x40	3	3	6
TOTAL				15	13	28

Para o método transiente com a sonda de superfície do ISOMET foram produzidos 3 provetes de cada formulação de forma cilíndrica com diâmetro de 72 mm e altura de 30 mm de acordo com os intervalos de medidas estabelecidos pelo manual do equipamento, ou seja, diâmetro mínimo de 60mm e espessura entre 20mm e 40mm. Esta sonda mede valores dentro da gama 0,04 a 0,3 W/m.K. Uma vez que o valor esperado para a argamassa industrial A^{EPS} está compreendido dentro desta gama de valores ($\lambda=0,042$ W/m.K, ficha técnica), é esperado obter-se bons resultados com esta sonda. No entanto, para a composição com adição de aerogel A^{EPS+Ag} espera-se que o valor de λ baixe consideravelmente tal como no estudo (Sousa, 2017) e, assim, que não esteja compreendido na gama de valores medidos por esta sonda. Surgiu então a necessidade de utilização de outra sonda, com uma gama de valores mais baixos, tendo-se utilizado a sonda de agulha do mesmo equipamento, ISOMET, que mede valores de condutibilidade térmica na gama entre 0,01 e 0,05 W/m.K.

Os provetes produzidos para esta sonda foram também definidos de acordo com os valores fornecidos no manual do equipamento, que estabelece que o diâmetro deve estar entre 45mm e 80mm e a altura deve ser superior a 90mm. Foram então utilizados moldes com 67mm de diâmetro e 130mm de altura e produzidos 3 provetes de cada pasta, A^{EPS} e A^{EPS+Ag}. Na Figura 3.2 estão representados estes moldes cilíndricos, à esquerda antes da colocação da argamassa e à direita depois de concluído o enchimento e realizada a furação com a própria sonda de agulha para posterior utilização da mesma.



Figura 3.2: Provetes cilíndricos para utilização do equipamento ISOMET e disco de Lee, à esquerda por preencher e à direita já preenchidos

Para o método HFM1 foram utilizados os provetes ilustrados na Figura 3.3 a), com dimensões $300 \times 300 \times 27 \text{ mm}^3$, e para método HFM2 foram utilizados os provetes ilustrados na Figura 3.3 b), com dimensões $40 \times 40 \times 40 \text{ mm}^3$.

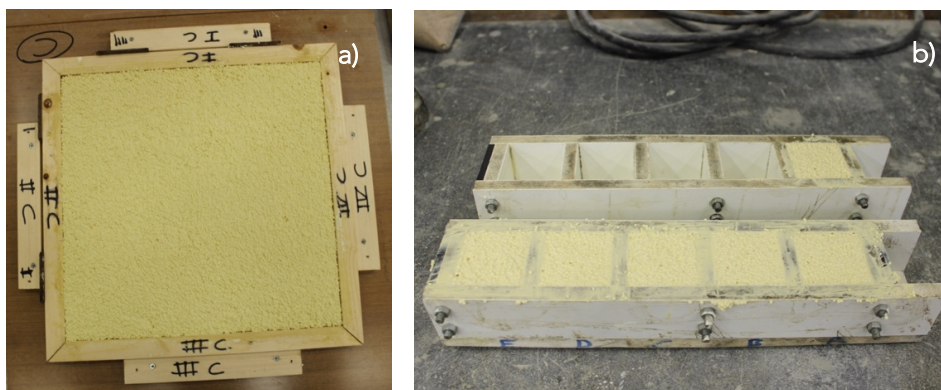


Figura 3.3: Provetes prismáticos para os ensaios com os métodos Heat Flow Meter a) HFM1 e b) HFM2

3.5 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A produção seguiu o mesmo procedimento definido para todas as argamassas de modo a todas as amostras terem as mesmas características e poderem ser comparados os resultados obtidos. O procedimento foi definido com base na norma EN 1015-11 (1999), à qual foram feitos pequenos ajustes de maneira a adaptar-se aos materiais e condições disponíveis em laboratório. Os provetes depois de cheios foram colocados em câmara seca com condições controladas de humidade e temperatura.

- Começa-se por pesar a argamassa em pó e o aerogel;

- Com um saco de plástico mistura-se agitando bem o pó com o aerogel de forma a obter uma mistura homogênea;
- Na taça da misturadora começa-se por colocar parte da água, junta-se a mistura pó e aerogel e mexe-se toda a mistura manualmente com uma espátula e adiciona-se aos poucos a água necessária até se obter uma consistência desejada, ou seja, com uma boa trabalhabilidade;
- Coloca-se a taça na misturadora e efetuou-se uma mistura mecânica durante 2 minutos (120 segundos) a uma velocidade relativamente baixa, 62+140 r.p.m. [W11];
- De seguida, com o recurso a uma espátula, remove-se o material que ficou nas paredes do recipiente e envolve-se com a restante pasta (Figura 3.4);
- Preparam-se os moldes e aplica-se o óleo desmoldante em pequena quantidade para não haver excessos;



Figura 3.4: Aspeto da argamassa A^{EPS+Ag} depois de misturada.

- Depois de tudo preparado antes de encher os moldes começa-se por medir a massa volúmica da pasta no estado fresco. Enche-se um recipiente cilíndrico com o mesmo procedimento descrito a seguir para o enchimento dos provetes e mede-se a massa na balança.
- Para o enchimento dos provetes coloca-se argamassa mais ou menos até meia altura e dá-se 25 pancadas com o pilão, coloca-se novamente argamassa em dose generosa para que fique um pouco mais alta que o molde e dá-se novamente 25 pancadas com o pilão de modo a obter uma correta compactação da pasta. Com o recurso à espátula alisa-se a superfície retirando o excesso, este processo deve ser

feito do meio para as pontas e com a espátula a 45° de inclinação com a superfície do molde.

- Depois dos moldes estarem preenchidos colocam-se os moldes dentro de sacos de polietileno e colocam-se na camara seca que está a uma temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e humidade relativa de 50%, os provetes ficam nestas condições durante um período de 7 dias;
- Terminado este período retiram-se os sacos e procede-se à descofragem dos provetes. Os provetes depois de descofrados colocam-se em tabuleiros apoiados em ripas de madeira de maneira a permitir uma melhor e mais uniforme secagem e são novamente colocados na camara seca onde permanecem até terem 28 dias.

A balança utilizada tem a precisão de 0,1g e o recipiente utilizado para medir a massa volúmica tem 200ml de volume. A misturadora disponível no laboratório tem duas velocidades, tendo sido selecionada a velocidade mais baixa devido à resistência dos materiais.

No caso dos provetes cilíndricos destinados à utilização da sonda de agulha foi ainda feita a furação da pasta com a própria sonda para prevenir a eventual fissuração no caso de esta ser realizada depois de endurecidos os provetes. Esta furação foi feita cerca de 15 minutos após o enchimento dos respetivos moldes quando a pasta já tem alguma resistência. A altura da furação foi até ficar a cerca de 0,5 cm de distância entre a pega de plástico do equipamento e a superfície da argamassa garantindo que a sonda fique cerca de 10,5 cm no interior do provete aquando a medição.

3.6 DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS A REALIZAR

3.6.1 Caracterização das argamassas no estado fresco

No estado fresco foi realizado apenas um ensaio, a medição da massa volúmica aparente, segundo a normal EN 1015-6 (CEN, 1998). Na Figura 3.5 está representado o cilindro metálico utilizado, de volume 200ml.

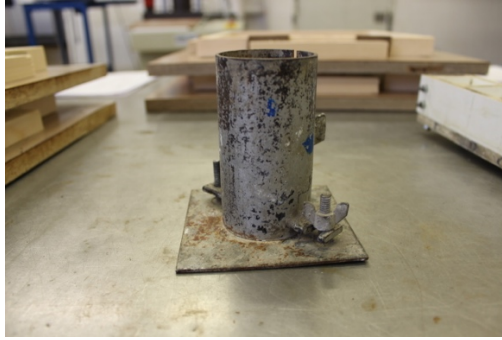


Figura 3.5: Cilindro utilizado para medir a massa volúmica aparente no estado fresco.

A massa volúmica aparente, ρ , é definida pela razão entre a massa e o volume de uma amostra segundo a norma EN 1015-6 (1998), e tem como unidades do sistema internacional (S.I.) kg/m^3 (Equação 3.1.):

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad \text{Equação 3.1.}$$

Em que:

ρ - Massa volúmica aparente [kg/m^3];

m_2 - Massa total da amostra [kg];

m_1 - Massa do recipiente [kg];

V - Volume da amostra [m^3];

De seguida, descreve-se o procedimento utilizado para a medição da massa volúmica aparente das amostras:

- Procede-se à medição do volume e da massa do recipiente a utilizar, tarando de seguida a balança;
- Enche-se o recipiente até meia altura e faz-se a compactação dando cinco pancadas verticais na mesa vibratória;
- Enche-se o resto do recipiente, deixando a pasta um pouco acima da altura final a contar com a compactação e dá-se mais cinco pancadas verticais na mesa vibratória;
- Por fim, alisa-se a superfície da amostra com uma espátula recorrendo ao mesmo método utilizado no enchimento dos provetes e é medida a massa da amostra na balança.

Para este processo foi utilizada uma balança com precisão de 0,01g e uma mesa vibratória homologada segundo a EN 1015-3 (1998). Com os valores medidos neste processo e com a equação 3.1. calcularam-se as massas volúmicas para cada uma das argamassas a ensaiar, A^{EPS} e A^{EPS+Ag} .

3.6.2 Caracterização das argamassas no estado endurecido

Para o estado endurecido, os provetes foram inicialmente avaliados para duas condições de humidade diferentes, uma para o teor de humidade existente nas condições de laboratório (câmara seca a 50%) e outra para os provetes em estado seco.

Foram realizados os ensaios de medição da massa volúmica e do coeficiente de condutibilidade térmica. Este último ensaio foi realizado por três métodos diferentes: *ISOMET* que usa diferentes sondas (superfície e agulha); *HFM1* e *HFM2*. Todos os ensaios à exceção do *HFM2* foram realizados para ambas as condições de humidade, no caso do *HFM2* foi realizado apenas o ensaio para as condições de humidade do laboratório, por uma questão de disponibilidade.

Para a obtenção dos provetes em estado seco, a sua secagem foi feita numa estufa a 60°C, e durante aproximadamente quatro dias. O critério de paragem foi a medição da massa volúmica aparente em dois dias consecutivos com verificação de estabilidade dos resultados (variação inferior a 1%).

Depois de retirados os provetes da estufa foram logo realizadas as medições da massa volúmica aparente, e logo de seguida envolveram-se os provetes com película aderente, para que estes não ganhassem humidade.

Uma vez que os ensaios com o equipamento *ISOMET* implicam a estabilização das condições de temperatura dos provetes estes só foram realizados um dia depois dos provetes terem saído da estufa para que a temperatura fosse próxima à do laboratório, o que faz com que a colocação da película aderente seja fundamental para a manutenção dos provetes em estado seco.

Depois de analisados para o estado endurecido seco, os provetes destinados ao equipamento *ISOMET*, sonda de Agulha, foram colocados na câmara húmida onde estão em contacto com água na forma de vapor e ensaiados de 2 em 2 dias para diferentes teores de água. Este processo normalmente realiza-se começando por saturar os provetes

e depois coloca-los numa estufa, obtendo-se os diferentes teores de água do estado saturado para o estado seco. Neste caso devido à elevada fragilidade dos provetes, estes foram antes colocados em câmara húmida, obtendo-se os diferentes teores de água a partir do estado seco.

3.6.2.1 Massa volúmica aparente

Este ensaio seguiu os procedimentos na norma EN 1015-10 (1999) e foi realizado para os provetes a ensaiar nos equipamentos *ISOMET* e *Rapid K*. O ensaio consiste na pesagem dos provetes e no cálculo da massa volúmica, tal como já descrito para a argamassa no estado fresco, pela razão entre a massa e o volume da amostra (equação 3.1). Na Figura 3.6 pode observar-se a realização deste ensaio.



Figura 3.6: Pesagem de provete para ensaio de determinação de massa volúmica.

Uma vez que este ensaio não é destrutivo e não causa qualquer alteração nos provetes ensaiados, este foi realizado em provetes destinados a outros ensaios.

3.6.2.2 Condutibilidade térmica

A condutibilidade térmica de um material está diretamente relacionada com as suas características de transmissão de calor e exprime a taxa de transferência de energia por difusão de cada material, ou mais precisamente, a quantidade de calor por unidade de tempo (fluxo de calor) que atravessa um dado material com espessura e área unitárias por unidade de diferença de temperatura entre as suas duas faces (Real *et al.*, 2016). A condutibilidade térmica representa-se por λ e tem como unidades do sistema internacional (S.I.) W/m.K. O valor de λ de um material depende das características físicas do próprio material e das condições ambiente a que este está exposto, sendo que os fatores que mais influenciam são a massa volúmica do material, a temperatura e o teor de

água (Franco, 2007). A condutibilidade térmica de um material aumenta com o aumento da temperatura, pois ocorre uma excitação das moléculas mais elevada, e aumenta também com o aumento do teor de humidade, pois o favorece as trocas de calor por condução, pelo facto de a água ter uma condutibilidade térmica elevada (Callister et al., 2003).

De seguida, descrevem-se os respetivos procedimentos de realização de cada ensaio. Na Tabela 3.5 apresentam-se as características dos equipamentos utilizados para medição do coeficiente de condutibilidade térmica.

Tabela 3.5: Tabela resumo das características dos equipamentos utilizados para medir o coeficiente de condutibilidade térmica

Ensaio	Marca	Equipamento		Gama	Precisão	Temperatura Média de Ensaio
	Applied Precision	ISOMET 2114	Superfície	0,04 – 0,3 W/m.K	5% + 0,001 W/ m.K	20°C
			Agulha	0,01 – 0,05 W/m.K	5% + 0,001 W/ m.K	20°C
HFM1	HoloMetrix	Rapid K		0,015 – 0,43 W/m.K	5%	40°C
HFM2	n.d.	n.d.		0,02 – 0,8 W/m.K	-	47,5°C
Disco de Lee	n.d.	n.d.		-	-	30,1°C

n.d. – não disponível

i) ISOMET

O equipamento *ISOMET 2114* utiliza o método transiente e utiliza dois tipos de sondas, uma de superfície e uma de agulha, cada uma delas destinada a uma gama diferente de valores. A sonda de superfície destina-se a provetes com valores de condutibilidade térmica no intervalo 0,04 – 0,3 W/m.K e a sonda de agulha a valores no intervalo 0,015 – 0,05 W/m.K.

Os ensaios foram realizados segundo os seguintes procedimentos:

- ligar o aparelho à corrente;
- conectar a sonda de superfície ou de agulha ao equipamento;

- colocar uma placa de poliestireno por debaixo da amostra a ensaiar e colocar a amostra com a superfície mais lisa para cima, para o caso da sonda de superfície. Para a sonda de agulha a placa de poliestireno não é necessária e a amostra deve ser colocada com a superfície mais rugosa para cima, pois é a superfície que tem a furação realizada no estado fresco, destinada à utilização da respetiva sonda (Figura 3.7);
- colocar a sonda em contacto com a amostra;
- ligar o equipamento premindo o botão *Power* durante 3 segundos;
- seleccionar a gama de valores premindo F5 e depois F1 e sair do menu premindo o botão *Esc*;
- iniciar o ensaio premindo o botão *F1*;
- quando o ensaio terminar consultar os resultados premindo o botão *F4*.

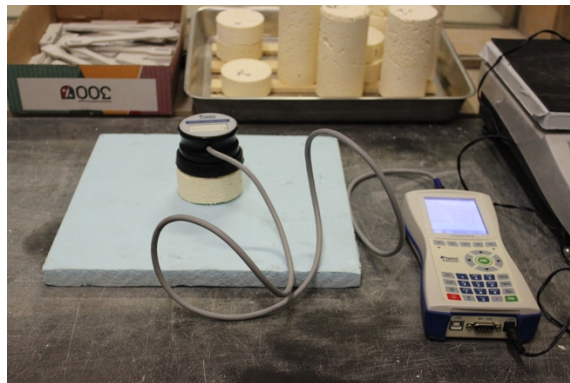


Figura 3.7: Ensaio com o equipamento ISOMET – sonda de Superfície.

Os ensaios foram realizados nas condições atmosféricas de humidade relativa de 50% e temperatura de $20^{\circ} \pm 5^{\circ}$. Os resultados apresentam um erro de medição de $5\% + 0,001 \text{ W/m.K}$ para valores entre 0,015 e 0,3 (*Applied Precision*).

Este equipamento não fornece apenas o coeficiente de condutibilidade térmica, mas também a capacidade calorífica volumétrica c_p ($\text{J/m}^3.\text{K}$), e a difusidade térmica α (m^2/s) assim sendo, estes resultados foram também registados e estudados.

A capacidade calorífica volumétrica (c_p) define-se pela quantidade necessária de energia em J a fornecer a 1 m^3 do material para que este aumente a sua temperatura em 1°C , e tem como unidades $\text{J/m}^3.\text{K}$.

ii) HFM1

Para o ensaio HFM1 utilizou-se o equipamento *Rapid K*, que utiliza o método transiente Heat Flow Meter e gera um fluxo de calor estacionário entre duas placas paralelas, com temperaturas diferentes, mas constantes ao longo do ensaio. Estas temperaturas podem ser selecionadas no painel de controlo do equipamento, Figura 3.8. Para os ensaios realizados foram selecionadas as temperaturas de 30° para a placa inferior e 50° para a placa superior, criando assim um fluxo com direção vertical perpendicular à placa com o sentido de cima para baixo. Este equipamento mede amostras com condutibilidade térmica na gama de valores de 0,015 – 0,43 W/m.K e os resultados apresentam um erro associado de 5% (Manual).



Figura 3.8: Ensaio com o equipamento Rapid K.

Para este ensaio é necessário numa fase inicial utilizar uma amostra de calibração. Esta amostra é em lã mineral, material cujo comportamento térmico em função da temperatura é conhecido e que, por isso, permite calcular um parâmetro de calibração, necessário para os ensaios seguintes nas mesmas condições. Este procedimento deve ser repetido em todos os dias de ensaio.

O procedimento de realização do ensaio segue a norma Americana ASTM C518 (2010), a norma europeia EN ISO 8301 (1991) e a norma portuguesa NP EN 12667 (2007) e é descrito seguidamente:

- ligar o equipamento à corrente;
- abrir a água que está ligada ao sistema de refrigeração e verificar se está a sair no esgoto;
- ajustar as temperaturas das placas, inferior e superior, para o ensaio;

- colocar a amostra no equipamento, posicionar com a alavanca metálica, trancar com a rosca e fechar a tampa;
- ligar o equipamento carregando no botão *Main Power*;
- dar início ao ensaio carregando no botão *Reset*;
- registar os valores de Q , Δx , T_U e T_L rodando o botão para o efeito no painel de instrumentos. Fazer o primeiro registo 30 minutos após o início do ensaio e depois com intervalos de 15 minutos até se obter uma diferença do quociente de Q por ΔT entre medições consecutivas inferior a 1%;

O coeficiente de condutibilidade térmica determina-se utilizando a Lei de Fourier (Equação 3.2.):

$$\frac{Q}{A} = \lambda \times \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{Equação 3.2.}$$

em que:

Q/A – Fluxo de calor por unidade de área [W/m^2];

λ - Coeficiente de condutibilidade térmica [$W/m.K$];

Δx – Espessura do provete [m];

ΔT – Diferença de temperatura entre as placas [K];

O parâmetro de calibração é calculado com a amostra de calibração de fibra de vidro, para todos os dias em que se realizem ensaios, pela Equação 3.3.:

$$N = \frac{\lambda_{calibração}(T_U - T_i)}{\Delta x \times Q} \quad \text{Equação 3.3.}$$

Considerando o parâmetro de calibração N , calcula-se a condutibilidade térmica do material da amostra utilizando-se a Equação 3.4.:

$$\lambda = N \times \Delta x \times \frac{Q}{\Delta T} \quad \text{Equação 3.4.}$$

Em que:

N - Valor de calibração obtido no primeiro ensaio do dia com a amostra de fibra de vidro.

Δx – Espessura do provete [m];

ΔT – Diferença de temperatura entre as placas [K];

Q – Fluxo de calor [W];

iii) *HFM2*

Para o ensaio HFM2 utilizou-se um equipamento desenvolvido pela Universidade de Aveiro que induz um fluxo de calor estacionário e unidirecional entre duas placas paralelas, por imposição de temperaturas diferentes em ambas as placas, mas constantes, ao longo do ensaio. A placa fria está a uma temperatura de 40°C e a placa quente a 55°C. O ensaio é realizado envolvido por placas de isolante térmico para minimizar perdas de calor (a condutibilidade térmica do isolante utilizado é de aproximadamente 0,035 W/m.K.). O ensaio tem a duração mínima de 12 horas.

O procedimento de realização deste ensaio segue a norma americana ASTM C518 (2010) e baseia-se em Senff *et al.* (2016):

- conectar o equipamento a um sistema de refrigeração;
- colocar a amostra no equipamento paralelamente às placas ajustando as placas à amostra;
- monitorizar as temperaturas das placas bem como o fluxo de calor durante pelo menos 12 horas e até que o valor medido estabilize;

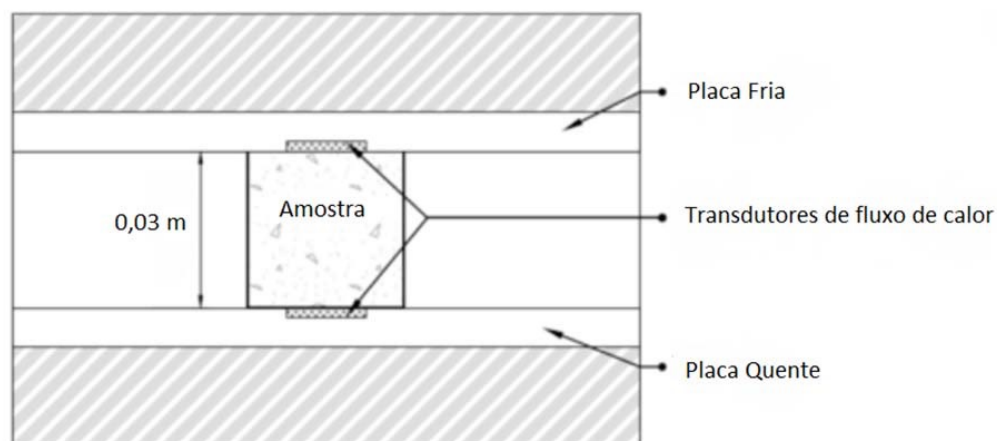


Figura 3.9: Esquema de ensaio, método HFM2 (adaptado de Senff *et al.*, 2016)

O coeficiente de condutibilidade térmica calcula-se com base na Lei de Fourier, utilizando a seguinte expressão (equação 3.5.):

$$\lambda = \frac{S'E' \times S''E''}{2} \times \frac{L}{\Delta T} \quad \text{Equação 3.5.}$$

em que:

λ - Coeficiente de condutibilidade térmica [W/m.K];

S' e S'' – Fatores de calibração dos transdutores de fluxo de calor [W/m²V];

E' e E'' – Valores do fluxo de calor obtidos pelos transdutores [V];

L – Espessura da amostra [mm];

ΔT – Diferença de temperatura entre as placas [°C];

As principais diferenças entres estes dois últimos equipamentos (HFM1 e HFM2) são as dimensões das amostras e o tempo de ensaio, enquanto o equipamento Rapid K (HFM1) para materiais com as gamas de condutibilidade térmica em estudo demora cerca de 2 horas a realizar cada ensaio, no caso do equipamento desenvolvido pela Universidade de Aveiro (HFM2) os ensaios têm uma duração de cerca de 12 horas. Para tornar o estudo mais interessante escolheram-se temperaturas diferentes para as placas dos dois ensaios.

iv) *Disco de Lee*

O Disco de Lee é um método estacionário e o seu ensaio realiza-se em duas fases. Na primeira fase a amostra é colocada entre duas placas de cobre e o sistema é aquecido até atingir o estado estacionário e as temperaturas são registadas, esta fase tem como princípio admitir que o fluxo de calor estacionário que é transferido da amostra para a placa de cobre é igual ao fluxo de calor que a placa de cobre transfere para o meio ambiente que o envolve. Na segunda fase o disco 2 é colocado na fonte de calor e é aquecido até 10-15°C acima da sua temperatura de equilíbrio (da fase 1). Posteriormente a amostra é colocada sobre o disco 2 e a temperatura é medida em intervalos de tempo definidos. Esta segunda fase tem como princípio de base que o fluxo de calor que se perde do disco 2 para o ambiente durante o arrefecimento da fase 2 (equação 3.7) é idêntico ao que se perdia do disco 2 na fase 1 para essa mesma temperatura de equilíbrio da fase 1, que, por sua vez, é igual ao fluxo de calor que atravessava a amostra na fase 1 para o mesmo estado estacionário (Equação 3.6). Permite assim igualar o fluxo de calor nas duas fases, para a temperatura de equilíbrio, e determinar o coeficiente de condutibilidade térmica da amostra (Fidalgo *et al.*, 2013; [W10]).

O ensaio é realizado segundo o seguinte procedimento:

- ligar a fonte de calor;
- permitir que todo o sistema atinja estado estacionário;
- registar a temperatura T_1 e T_2 assim que o estado estacionário seja atingido;
- depois de registar as temperaturas, retirar o material da amostra;
- colocar o disco 2 na fonte de calor e deixar a sua temperatura subir acima da sua temperatura de estado estável (T_2) em 10-15 ° C;
- Remover a amostra da fonte de calor e desligá-la;
- Colocar rapidamente o material isolante (a amostra) sobre o disco de cobre que cobre toda a sua área;
- deixar o disco de cobre inferior arrefecer;
- começar a registar a temperatura em intervalos de tempo regulares (5 segundos);
- registar as temperaturas até ao equilíbrio com a temperatura ambiente;
- traçar um gráfico de Temperatura vs Tempo manualmente ou usar qualquer programa disponível. Calculando a inclinação da linha tangente à curva de arrefecimento do disco de cobre em T_2 manualmente, que vai representar $\frac{\partial T}{\partial t}$.



Figura 3.10: Ensaio com o método Disco de Lee

Na Figura 3.10 é possível observar-se o ensaio Disco de Lee a decorrer. Para a condição inicial temos que o fluxo de calor pode ser determinado pela lei de Fourier, Equação 3.6.:

$$Q = \lambda_{amostra} A_{amostra} \frac{T_2 - T_1}{x} \quad \text{Equação 3.6.}$$

Em que:

Q – Fluxo de calor [W];

$\lambda_{amostra}$ – Coeficiente de condutibilidade térmica da amostra [W/m.K];

A – Área da amostra perpendicular ao fluxo [m²];

T₂ – Temperatura do disco 2 [K];

T₁ – Temperatura do disco 1 [K];

x – Espessura da amostra [m];

Em na segunda fase o fluxo de calor é determinado para o arrefecimento pela Equação 3.7.:

$$Q = m_{disco2} C p_{disco2} \frac{\partial T}{\partial t} \quad \text{Equação 3.7.}$$

Em que:

Q – Fluxo de calor [J/s];

m_{disco2} – Massa do disco 2 [kg];

C_{p_{disco2}} – Calor específico do disco 2 [J/kg.K];

$\frac{\partial T}{\partial t}$ - Declive da reta tangente ao gráfico de arrefecimento em T₂ [K/s];

Pelo princípio que o fluxo de calor é igual na segunda fase e na primeira, para a mesma temperatura de equilíbrio da fase 1 iguala-se as duas expressões e assim determina-se o coeficiente de condutibilidade térmica da amostra pela Equação 3.8.:

$$\lambda_{amostra} = \frac{m_{disco2} C p_{disco2} \frac{\partial T}{\partial t}}{A_{amostra} \frac{T_2 - T_1}{x}} \quad \text{Equação 3.8.}$$

Uma vez que as amostras revelaram elevada fragilidade e a maior parte delas partiu-se ao desmoldar, este ensaio foi apenas realizado em duas amostras, uma da argamassa A^{EPS} e outra da A^{EPS+Ag}.

3.7 TRATAMENTO DE DADOS

Foi determinado o teor de água (Ψ) em volume como definido pela norma EN ISO 10456 (2007), para as diferentes condições analisadas, de cada provete. Estes valores foram calculados segundo a Equação 3.9.:

$$\Psi = \frac{(m_i - m_{seco})}{\rho_{\text{água}}} / V \quad \text{Equação 3.9.}$$

Em que:

Ψ - Teor em água em volume [m^3/m^3];

m_i - Massa para um determinado teor em água [kg];

m_{seco} - Massa para o estado seco [kg];

$\rho_{\text{água}}$ - Densidade da água que é 1000 [kg/m^3];

V - Volume do provete [m^3];

Uma vez que o valor do coeficiente de condutibilidade térmica varia com as condições de humidade e temperatura, e que os ensaios realizados foram realizados a temperaturas diferentes, é preciso fazer-se a conversão dos valores obtidos para os diferentes ensaios de maneira a poder compará-los com rigor (Gomes *et al.*, 2017). A norma ISO 10456 (2007) define que os valores devem ser declarados para uma de quatro condições possíveis: Ia) temperatura de referência de 10°C e estado seco; Ib) temperatura de referência de 10°C e teor em água para as condições de equilíbrio a 23°C e 50% de humidade relativa; IIa) temperatura de referência de 23°C e estado seco; IIb) temperatura de referência de 23°C e teor em água para as condições de equilíbrio a 23°C e humidade relativa de 50% (ref). No caso desta campanha experimental os ensaios foram realizados para condições próximas das condições IIa) e IIb), pelo que as conversões consideradas foram para estas condições (Gomes *et al.*, 2017).

O fator de conversão calcula-se segundo (Gomes *et al.*, 2017) como identificado na norma ISSO 10456 (2007) pela Equação 3.10.:

$$F_i = e^{f_i(t_2 - t_1)} \quad \text{Equação 3.10.}$$

Em que:

F_i - Fator de conversão para a temperatura ($i = T$), para o teor em água ($i = \Psi$) e para a idade ($i = \alpha$);

f_i - Coeficiente de conversão para a temperatura ($i = T$), para o teor em água ($i = \Psi$) e para a idade ($i = \alpha$);

i_1 - Temperatura ($i = T$), teor em água ($i = \Psi$) ou idade ($i = \alpha$) para as primeiras condições estabelecidas;

i_2 - Temperatura ($i = T$), teor em água ($i = \Psi$) ou idade ($i = \alpha$) para as segundas condições estabelecidas;

O coeficiente de conversão da temperatura (f_t) foi de 0,003 e do teor em água (f_Ψ) de 4, segundo a norma ISO 10456 (2007).

Os valores do coeficiente de condutibilidade térmica são convertidos das condições de ensaio para as condições desejadas pela expressão seguinte (Equação 3.11.):

$$\lambda_2 = \lambda_1 F_T F_\Psi F_\alpha \quad \text{Equação 3.11.}$$

Em que:

λ_1 - Coeficiente de condutibilidade térmica nas condições iniciais;

λ_2 - Coeficiente de condutibilidade térmica nas segundas condições;

F_T - Fator de conversão de temperatura;

F_Ψ - Fator de conversão do teor em água;

F_α - Fator de conversão da idade;

Para este trabalho foram considerados o fator de conversão para a temperatura e para o teor em água, não foi considerado o fator de conversão para a idade uma vez que as amostras não foram sujeitas a ensaios de envelhecimento.

3.8 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Na campanha experimental foram produzidas duas formulações de argamassa, uma argamassa térmica industrial, de base mineral e ligantes cal e cimento e outra igual à anterior com a adição do agregado aerogel. Foram utilizados cinco métodos de medição do coeficiente de condutibilidade térmica, dois transientes e três estacionários, para os quais foram produzidos provetes de diferentes dimensões e geometria, perfazendo um total de 28 provetes.

Este capítulo descreve o procedimento experimental adotado para a caracterização das duas argamassas no estado fresco, no estado endurecido aos 28 dias, após secagem, e para diferentes teores de água. Na tabela 3.6 é possível ver a síntese de todos os ensaios realizados.

Tabela 3.6: Síntese dos ensaios realizados neste estudo.

				Estado Fresco		Estado Endurecido						Sub Total		
						Aos 28 dias		Seco		Para vários teores em água				
Ensaio	Norma	Equipamento		Provetes	A ^{EPS}	A ^{EPS+Ag}	A ^{EPS}	A ^{EPS+Ag}	A ^{EPS}	A ^{EPS+Ag}	A ^{EPS}	A ^{EPS+Ag}	A ^{EPS}	A ^{EPS+Ag}
Massa Volúmica	EN 1015 - 10	Balança		Vários	1	1	9	7	9	7	9	9	28	24
Condutibilidade Térmica	-	ISOMET	Sonda de Superfície	D=72 h=30	-	-	3	3	3	3	-	-	6	6
	-		Sonda de Agulha	D=67 h=130	-	-	3	3	3	3	9	9	15	15
	ASTM C518 (2010) e ISO 8301 (1991)	HFM1		300x300x30	-	-	3	1	3	1	-	-	6	2
	ASTM C518 (2010)	HFM2		40x40x40	-	-	3	3	-	-	-	-	3	3
	-	Disco de Lee		D=45 h=7	-	-	1	1	-	-	-	-	1	1
Sub Total					1	1	22	18	18	14	9	9	59	51
Total												110		

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo pretende-se avaliar, discutir e comparar os resultados obtidos para os diferentes métodos de medição do coeficiente de condutibilidade térmica, e assim caracterizar as argamassas térmicas em estudo. Pretende-se também avaliar a adequabilidade dos diferentes métodos utilizados. Os resultados obtidos encontram-se organizados por ensaio, em tabelas individuais.

4.2 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

Uma vez que a argamassa A^{EPS} em estudo é industrial e, por isso, a quantidade de água a acrescentar à mistura é pré-definida, a avaliação da trabalhabilidade para esta argamassa foi feita apenas qualitativamente. Para a argamassa A^{EPS+Ag} , com introdução de aerogel, a quantidade de água a acrescentar à mistura foi determinada durante a produção da mesma, tendo em conta a sua trabalhabilidade. Tendo-se obtido um rácio de água/pó de 1,85 para a argamassa A^{EPS+Ag} face a 1,10 para a argamassa A^{EPS} .

4.2.1 Massa volúmica

A Tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos para a massa volúmica no estado fresco (em pasta) para as duas argamassas ensaiadas.

Tabela 4.1: Resultados obtidos para a massa volúmica aparente no estado fresco.

Designação	Aerogel/pó (em massa)	Massa Volúmica (ρ) (kg/m^3)	Δ (%)
A^{EPS}	0	343,00	-
A^{EPS+Ag}	1,00	288,75	15,82

Legenda: ρ - massa volúmica aparente; Δ - Variação face à argamassa A^{EPS}

O resultado obtido para a massa volúmica da argamassa industrial A^{EPS} no estado fresco foi de 343 kg/m^3 o que é consistente com o valor indicado pelo fabricante, $350 \pm 75 \text{ kg/m}^3$ (WSG, 2016). A adição de aerogel, como esperado, fez baixar o valor da massa volúmica para $288,75 \text{ kg/m}^3$, o decréscimo foi na ordem dos 16% face à argamassa de referência.

Comparando ainda com outro estudo realizado com a mesma argamassa industrial (Sousa, 2017) obtiveram-se resultados na mesma ordem de grandeza.

4.3 CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Os ensaios realizados para o estado endurecido foram realizados aos 28 dias de idade dos provetes produzidos. Adicionalmente o teor de água dos provetes a ensaiar para este estado e para o estado seco foi também determinado.

4.3.1 Massa volúmica

Para o ensaio da massa volúmica foram utilizados 3 tipos de provetes, os destinados aos ensaios com o equipamento *ISOMET*, sonda de superfície e sonda de agulha, e os destinados aos ensaios com o método *HFM1*. Apresentam-se de seguida nas Tabela 4.2 a Tabela 4.4 os resultados obtidos para este ensaio no estado endurecido aos 28 dias para as duas argamassas ensaiadas, A^{EPS} e A^{EPS+Ag} . Os resultados apresentados são a média de 3 provetes iguais para cada tipo de provete, à exceção da placa destinada ao ensaio *HFM1* da argamassa A^{EPS+Ag} pois para este foi apenas produzido um provete.

Tabela 4.2: Resultados obtidos para a massa volúmica aparente no estado endurecido para os provetes destinados à sonda de superfície.

Designação	Aerogel/pó (em massa)	Massa Volúmica (ρ) (kg/m ³)	Δ (%)
A^{EPS}	0	216,16	-
A^{EPS+Ag}	1,00	140,27	35,11

Legenda: ρ - massa volúmica aparente; Δ - Variação face à argamassa A^{EPS}

Tabela 4.3: Resultados obtidos para a massa volúmica aparente no estado endurecido para os provetes destinados à sonda de agulha.

Designação	Aerogel/pó (em massa)	Massa Volúmica (ρ) (kg/m ³)	Δ (%)
A^{EPS}	0	229,32	-
A^{EPS+Ag}	1,00	138,45	39,63

Legenda: ρ - massa volúmica aparente; Δ - Variação face à argamassa A^{EPS}

O valor médio da massa volúmica aparente para a argamassa A^{EPS} foi de 222,45 kg/m³ e para a argamassa A^{EPS+Ag} de 132,67 kg/m³, o que representa um decréscimo de 40%.

Tabela 4.4: Resultados obtidos para a massa volúmica aparente no estado endurecido para os provetes destinados ao ensaio HFM1

Designação	Aerogel/pó (em massa)	Massa Volúmica (ρ) (kg/m ³)	Δ (%)
A^{EPS}	0	221,88	-
A^{EPS+Ag}	1,00	119,37	46,20

Legenda: ρ - massa volúmica aparente; Δ - Variação face à argamassa A^{EPS}

Os resultados obtidos para a argamassa A^{EPS} quando comparados com os valores fornecidos pelo fabricante, estes encontram-se ligeiramente fora do intervalo admitido pelo mesmo, 150 ± 50 kg/m³. Este facto pode ser justificado com pequenas diferenças no processo de mistura, nomeadamente no tempo da mesma. Mas quando comparados com o estudo realizado à mesma argamassa por Sousa (2017), verifica-se que se obtiveram valores muito próximos, o que valida os resultados obtidos em laboratório. O mesmo se verifica para os resultados obtidos para a argamassa A^{EPS+Ag} , que apesar de no estudo referido anteriormente não ter sido estudada a mesma composição, foi estudada uma outra muito semelhante para a qual se obteve valores muito próximos, 137 kg/m³.

Os resultados apresentam uma ligeira variabilidade que, especialmente no caso da argamassa A^{EPS+Ag} , pode ser justificada por diferentes compactações. Apesar de ter sido utilizado o mesmo procedimento para todos os provetes a diferente geometria dos mesmos, nomeadamente no que diz respeito à altura, pode justificar diferenças nos níveis de compactação entre provetes. No entanto, para a argamassa A^{EPS} os resultados vão de acordo aos teores de água determinados, ou seja, os provetes para a sonda de superfície são os que apresentam a massa volúmica aparente inferior e são também os que apresentam menor teor de água.

4.3.2 Coeficiente de condutibilidade térmica

Para os ensaios de condutibilidade térmica foram utilizados provetes de cinco geometrias diferentes para cada equipamento a utilizar, ISOMET (sonda de agulha e sonda de superfície), HFM1, HFM2 e Disco de Lee. Nas Tabela 4.5 a

Tabela 4.8 estão apresentados os resultados obtidos para os respetivos ensaios.

Os ensaios de condutibilidade térmica realizados com o equipamento *ISOMET* foram efetuados em condições controladas de temperatura de $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e humidade de 50%. Já os ensaios realizados pelo método *HFM1* por ser induzido um fluxo de calor entre duas placas com temperaturas diferentes, de 30°C e de 50°C , como explicado na descrição do ensaio no capítulo anterior, este realiza-se a uma temperatura média de 40°C . Também os ensaios realizados pelo método *HFM2* foram efetuados com duas placas com temperaturas diferentes, de 40°C e 55°C , com uma média de $47,5^{\circ}\text{C}$. Para os ensaios realizados pelo método do Disco de Lee o valor do coeficiente de condutibilidade térmica é obtido para a temperatura de $30,1^{\circ}\text{C}$. Assim, uma vez que o coeficiente de condutibilidade térmica é influenciado pela temperatura e devido à diferença das temperaturas de realização dos ensaios ser tão elevada é necessário fazer a correção dos resultados para uma só temperatura, para poder compará-los. Optou-se por converter os resultados obtidos para a temperatura de 23°C , condição IIb) da norma ISO 10456 (2007).

Tabela 4.5: Coeficiente de condutibilidade térmica no estado endurecido para o ensaio com a sonda de superfície.

Designação	λ (W/m.K)	Média	$\lambda_{23^{\circ}}$	Desvio Padrão	Δ (%)
A^{EPS}	0,0536	0,0537	0,0542	0,000378	-
	0,0533				
	0,0542				
$A^{\text{EPS+Ag}}$	0,0409	0,0410	0,0413	0,000048	23,71
	0,0410				
	0,0410				

Legenda: λ - coeficiente de condutibilidade térmica; σ - desvio padrão; Δ - Variação face à argamassa A^{EPS} ; $\lambda_{23^{\circ}}$ - coeficiente de condutibilidade térmica corrigido para 23°C

Tabela 4.6: Coeficiente de condutibilidade térmica no estado endurecido para o ensaio com a sonda de agulha.

Designação	λ (W/m.K)	Média	$\lambda_{23^{\circ}}$	Desvio Padrão	Δ (%)
A^{EPS}	0,0590	0,0578	0,0584	0,001525	-
	0,0557				
	0,0588				
$A^{\text{EPS+Ag}}$	0,0328	0,0350	0,0353	0,001702	39,48
	0,0353				
	0,0369				

Legenda: λ - coeficiente de condutibilidade térmica; σ - desvio padrão; Δ - Variação face à argamassa A^{EPS} ; $\lambda_{23^{\circ}}$ - coeficiente de condutibilidade térmica corrigido para 23°C

Tabela 4.7: Coeficiente de condutibilidade térmica no estado endurecido para o ensaio HFM1

Designação	λ (W/m.K)	Média	λ_{23°	Desvio Padrão	Δ (%)
A^{EPS}	0,0642	0,0668	0,0635	0,00243	-
	0,0703				
	0,0660				
A^{EPS+Ag}	0,0308	0,0308	0,0293	-	53,92

Legenda: λ - coeficiente de condutibilidade térmica; σ - desvio padrão; Δ - Variação face à argamassa A^{EPS} ; λ_{23° - coeficiente de condutibilidade térmica corrigido para 23°C

Tabela 4.8: Coeficiente de condutibilidade térmica para o estado endurecido para os provetes destinados ao ensaio HFM2

Designação	λ (W/m.K)	Média	λ_{23°	Desvio Padrão	Δ (%)
A^{EPS}	0,0377	0,0533	0,0495	0,00681	-
	0,0532				
	0,0533				
A^{EPS+Ag}	0,0290	0,0288	0,0267	0,00023	40,19
	0,0285				

Legenda: λ - coeficiente de condutibilidade térmica; σ - desvio padrão; Δ - Variação face à argamassa A^{EPS} ; λ_{23° - coeficiente de condutibilidade térmica corrigido para 23°C

Tabela 4.9: Coeficiente de condutibilidade térmica para o estado endurecido para o ensaio disco de Lee

Designação	λ (W/m.K)	λ_{23°	Δ (%)
A^{EPS}	0,0563	0,0559	-
A^{EPS+Ag}	0,0372	0,0366	33,93

Legenda: λ - coeficiente de condutibilidade térmica; Δ - Variação face à argamassa A^{EPS} ; λ_{23° - coeficiente de condutibilidade térmica corrigido para 23°C

Para a argamassa A^{EPS} foram obtidos valores entre 0,0495 e 0,0584 W/m.K e para a argamassa A^{EPS+Ag} foram obtidos valores entre 0,0267 e 0,0413 W/m.K e variações entre 24 e 40% entre as argamassas.

Os resultados obtidos para a argamassa industrial A^{EPS} quando comparados com o estudo (Sousa, 2017) realizado no mesmo laboratório do IST, apresentam valores muito semelhantes. No caso da sonda de superfície, o resultado obtido para a média dos provetes foi exatamente igual, 0,0542 W/m.K, o que indica que estes têm fiabilidade.

Os resultados obtidos no ensaio *HFM2* para a argamassa A^{EPS} apresentam um dos valores muito diferente dos outros dois que, quando comparado com os resultados dos restantes métodos, também não se aproxima dos valores obtidos, por isso este resultado não foi considerado para o valor médio obtido para o ensaio neste estudo. A argamassa A^{ESP} apresenta assim uma condutibilidade térmica próxima do valor declarado pelo fabricante, tendo-se obtido 0,0495 W/m.K face ao valor declarado de 0,042 W/m.K.

Os resultados com pelo ensaio *HFM1* são aqueles que apresentam maior diferença entre as duas argamassas quando comparados com os restantes quatro métodos. Enquanto para a argamassa A^{EPS+Ag} os resultados são semelhantes com o outro método estacionário *HFM2*, encontrando-se ambos abaixo dos resultados obtidos pelos métodos transientes, para a argamassa A^{EPS} os resultados para o método *HFM1* são os mais altos, não estando consistentes com o outro método estacionário e saindo fora do padrão.

Os resultados obtidos para o ensaio *Disco de Lee* estão de acordo com os resultados obtidos para os métodos transientes, aproximando-se mais dos obtidos com a sonda de agulha. O decréscimo atingido pela introdução de aerogel foi também inferior aos atingidos pelos métodos estacionários, ou seja, os valores do coeficiente de condutibilidade térmica entre a argamassa A^{EPS+Ag} e A^{EPS} encontram-se mais próximos. No entanto, estes resultados podem apresentar algum grau de incerteza uma vez que foi apenas realizado um ensaio para cada argamassa, uma vez que devido à sua geometria (espessura muito baixa) estes provetes apresentaram elevada fragilidade e a maior parte deles partiu-se, tendo ficado apenas um exemplar de cada argamassa em condições de serem ensaiados.

i) ISOMET sonda de superfície vs sonda de agulha

Apesar de todos os resultados apresentarem variabilidades muito baixas é possível verificar que os resultados obtidos com a sonda de superfície apresentam uma variabilidade inferior aos obtidos com a sonda de agulha. No caso da argamassa A^{EPS} esta variabilidade no ensaio realizado com a sonda de superfície foi de 1,67% e com a sonda de agulha 5,92%. E no caso da argamassa A^{EPS+Ag} para a sonda de superfície a variabilidade dos resultados foi de 0,24% e para a sonda de agulha de 12,5%. No entanto apesar de os resultados da argamassa A^{EPS+Ag} com a sonda de superfície terem apresentado uma variabilidade muito baixa não significa que estes tenham mais fiabilidade do que os

obtidos com a sonda de agulha. O motivo pelo qual foram muito constantes prende-se com o facto de estarem próximo do valor limite da sonda, ou seja, a argamassa A^{EPS+Ag} apresenta um coeficiente de condutibilidade térmica abaixo do limite inferior da sonda de superfície e assim as leituras registadas por esta sonda foram todas muito perto deste limite, 0,04 W/m.K. Os resultados obtidos para a argamassa A^{EPS} foram um pouco superiores com a sonda de agulha do que com a sonda de superfície, o que se deve parcialmente ao facto de os provetes para a sonda de agulha apresentarem um teor de água ligeiramente superior, 0,008 face a 0,006 (m^3/m^3). Pode também dever-se ao facto de os provetes poderem apresentar pequenas diferenças de compactação devido às suas diferentes geometrias.

ii) Métodos estacionários vs métodos transientes

Os resultados obtidos com os métodos estacionários foram geralmente mais baixos do que os obtidos para os métodos transientes. Isto pode estar relacionado com o facto de os ensaios para os métodos estacionários terem durações elevadas e serem realizados a temperaturas médias superiores, o que pode secar ligeiramente os provetes, ou seja, reduzir o teor de água dos mesmos e assim serem obtidos valores de condutibilidade térmica mais baixos. No entanto, quando comparados os resultados do método *HFM2* com os dos restantes métodos estes são bastante inferiores. Para a argamassa A^{EPS+Ag} a diferença dos valores obtidos entre o método *HFM2* e sonda de agulha são sensivelmente o dobro dos obtidos entre o método *HFM1* e a sonda de agulha, o que vai de encontro à afirmação anterior. Efetivamente, os ensaios do método *HFM2* têm uma duração superior a 12 horas e são realizados a uma temperatura média de 47,5°C e os ensaios do método *HFM1* têm uma duração média de apenas duas horas e são realizados a uma temperatura média de 40°C pelo que faria sentido que para o método *HFM1* a diferença face aos métodos transientes, por exemplo 0,0308 W/m.K face a 0,0353 W/m.K, não fosse tão evidente.

Uma maneira possível de verificar esta suposição seria a medição da massa volúmica no final do ensaio, pois o resultado do coeficiente de condutibilidade térmica nestes ensaios é obtido quando a amostra estabiliza, ou seja, no caso de haver uma perda de massa por secagem durante o ensaio os resultados obtidos seriam para a massa no final do ensaio e não no início dos mesmos. Seria importante medir a massa volúmica antes e depois da realização dos ensaios para os equipamentos que utilizam os métodos estacionários e

verificar se existe alguma perda de massa. Especialmente no caso dos equipamentos que têm tempos de realização de ensaio mais longos e para ensaios com temperaturas mais elevadas como é o caso do ensaio HFM2. No entanto, este procedimento não foi feito no decorrer deste trabalho, sugerindo-se aplica-lo em próximos trabalhos.

Na Tabela 4.10 apresentam-se os resultados de forma resumida de maneira a poder comparar os valores finais obtidos a 23°C para os diferentes métodos utilizados neste estudo e também a variação média.

Tabela 4.10: Comparação dos resultados obtidos para a condutibilidade térmica para os diferentes métodos, para a temperatura de 23°C [W/m.K]

Designação	ISOMET Sonda de Superfície	ISOMET Sonda de Aguilha	HFM1	HFM2	Disco de Lee	Δ (%) Média
A ^{EPS}	0,0542	0,0584	0,0635	0,0495	0,0559	-
A ^{EPS+Ag}	0,0413	0,0353	0,0293	0,0267	0,0366	41,88

Para a condutibilidade térmica da argamassa A^{EPS} obtiveram-se valores entre 0,0495 e 0,0584 W/m.K e para a argamassa A^{EPS+Ag} obtiveram-se valores entre 0,0267 e 0,0364 W/m.K, o que representa um decréscimo médio de 42% para a argamassa com aerogel. Para a variação média não foi considerada a variação para a sonda de superfície uma vez que os valores para a argamassa A^{EPS+Ag} são descartados por serem na realidade o limite inferior da sonda. Apresentam-se também estes resultados na Figura 4.1 de forma a poder comparar visualmente as diferenças obtidas entre os diferentes métodos utilizados.

Verifica-se que todos os resultados obtidos se encontram acima do valor declarado pelo fabricante, 0,042 W/m.K. De seguida apresenta-se também a Figura 4.2 onde se apresentam as variações dos resultados obtidos entre os diferentes métodos e o valor declarado pelo fabricante.

Relativamente ao valor declarado pelo fabricante (0,042 W/m.K) aos 28 dias para a temperatura de 23°C, o método HFM1 foi o que apresentou maior variação tendo sido cerca de 51% superior ao do fabricante; já o equipamento ISOMET registou valores de apenas 39% e 49% para a sonda de agulha e de superfície, respetivamente. Já o ensaio HFM2 obteve valores muito semelhantes aos declarados, apenas 18% acima. Para o ensaio

pelo método *Disco de Lee* os resultados obtidos encontram-se 34% acima do valor declarado pelo fabricante.

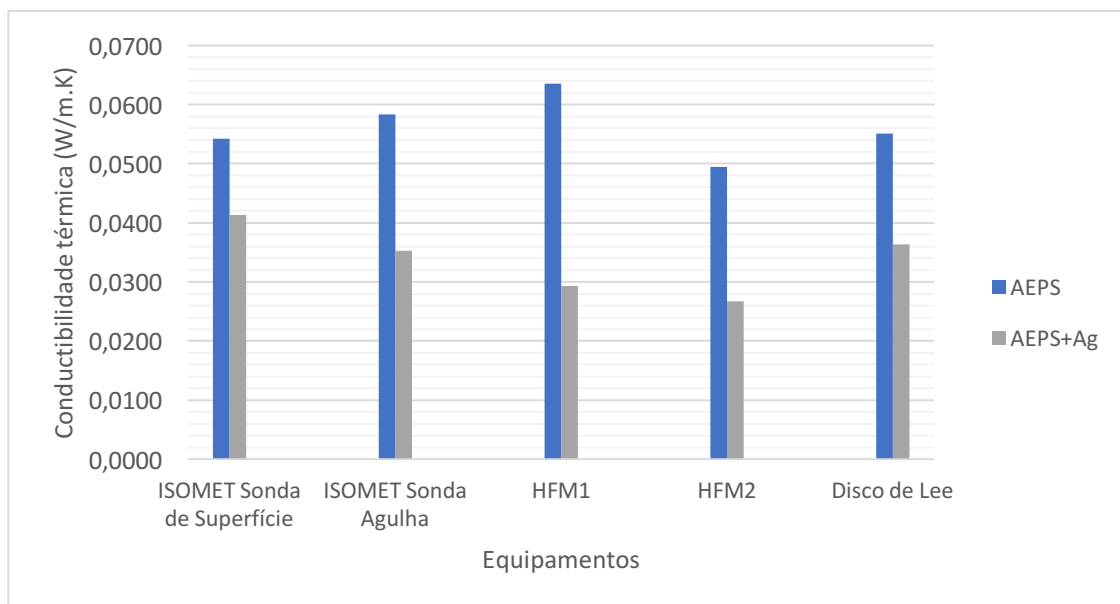


Figura 4.1: Comparação entre os resultados dos diferentes métodos utilizados.

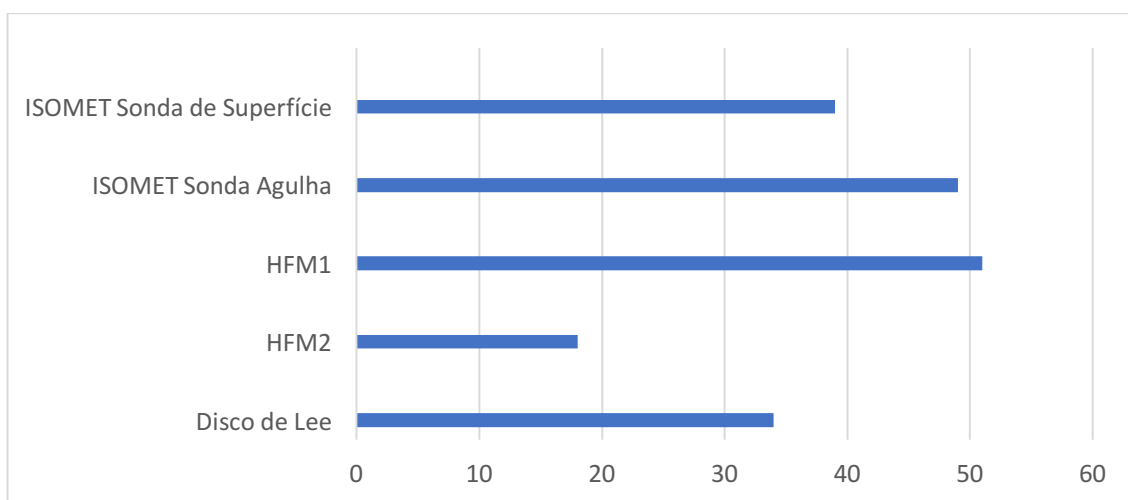


Figura 4.2: Variação relativa dos resultados obtidos para os diferentes métodos e o valor declarado pelo fabricante.

Se se admitisse, por hipótese, que as amostras para o ensaio *HFM2* estivessem secas no final do mesmo, ou seja, que teriam sofrido um processo de secagem completo durante o ensaio, ao aplicar-se as conversões (equações 10 e 11 do capítulo 3) do teor de água apenas para os outros ensaios obtiveram-se os resultados apresentados na Tabela 4.11, que são mais próximos entre eles e também mais próximos do valor declarado.

Tabela 4.11: Comparação dos valores de condutibilidade térmica corrigidos para o estado seco para os restantes métodos comparativamente aos obtidos diretamente do método HFM2 [W/m.K]

Designação	ISOMET Sonda de Superfície	ISOMET Sonda de Agulha	HFM1	HFM2	Disco de Lee
A ^{EPS}	0,0528	0,0565	0,0617	0,0495	-
A ^{EPS+Ag}	0,0405	0,0346	0,0302	0,0267	-

Os resultados para o *Disco de Lee* não são considerados nesta comparação uma vez que não foi possível determinar o teor de água das mesmas.

4.3.3 Teor de água

O teor de água foi calculado para o estado endurecido aos 28 dias apenas para os provetes que foram ensaiados para ambos, estado endurecido aos 28 dias e estado endurecido seco. São estes os provetes destinados aos ensaios com o equipamento ISOMET e aos ensaios com o método HFM1. Estes resultados apresentam-se na Tabela 4.12, em valores médios de três provetes à exceção da argamassa A^{EPS+Ag} para o HFM1 que foi produzido apenas um provete. No anexo A.1 apresentam-se também os valores individuais para o teor de água e respetivas massas volúmicas.

Tabela 4.12: Teores de água médios dos provetes

Provetes		Média teor de água (Ψ) (m ³ /m ³)
ISOMET superfície	A ^{EPS}	0,0063
	A ^{EPS+Ag}	0,0051
ISOMET agulha	A ^{EPS}	0,0081
	A ^{EPS+Ag}	0,0051
HFM1	A ^{EPS}	0,0073
	A ^{EPS+Ag}	0,0050

Apesar das diferentes geometrias, os provetes apresentam todos teores de água semelhantes, especialmente os provetes da argamassa A^{EPS+Ag} que apresentam todos teores de água iguais a 0,005 (m³/m³). No entanto, os provetes da argamassa A^{EPS} apresentam ainda valores ligeiramente diferentes, o que pode indicar que aos 28 dias estes ainda não estavam totalmente estabilizados. Estes valores estão em concordância com outro estudo realizado por Vale (2014).

No caso da argamassa A^{EPS} os provetes cilíndricos destinados aos ensaios com a sonda de agulha apresentam um teor de água ligeiramente superior aos provetes cilíndricos destinados aos ensaios com a sonda de superfície o que pode justificar os resultados também ligeiramente superiores para o coeficiente de condutibilidade térmica e para a massa volúmica.

4.4 CARATERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO SECO

A secagem na estufa reduz o teor de humidade dos provetes, ou seja, diminui o seu teor em água, o que faz diminuir a massa volúmica aparente. Uma vez que a massa volúmica está diretamente relacionada com o coeficiente de condutibilidade térmica, este decresce também. Neste subcapítulo é também feita uma análise comparativa entre os resultados obtidos para o estado endurecido e o estado endurecido seco.

As amostras da argamassa com aerogel apresentam uma maior fragilidade quando comparadas com as amostras sem este material, perdendo estas massa apenas com o manuseamento dos provetes. Este efeito foi mais evidente nas amostras em estado seco.

4.4.1 Massa volúmica

Após a secagem na estufa a 60°C os provetes foram novamente ensaiados relativamente à sua massa volúmica aparente. Este ensaio foi realizado logo após os provetes saírem da estufa e na mesma balança, com precisão de 0,01g. Nas Tabela 4.13 a Tabela 4.15 apresentam-se os resultados destes ensaios.

Os valores médios obtidos para a massa volúmica aparente para a argamassa A^{EPS} foi de 215,2 kg/m³ e para a A^{EPS+Ag} foi de 127,63 kg/m³, o que representa um decréscimo de 41% para a argamassa com introdução de aerogel.

Como expectável, verifica-se uma diminuição da massa volúmica aparente dos provetes, o que se deve ao facto do processo de secagem retirar praticamente toda a água líquida existente nos provetes quando estes se encontram em equilíbrio com a humidade do ar. Esta variação foi entre os 2,9 e os 4,22% tendo sido registada a média de 3,56%.

Tabela 4.13: Massa volúmica aparente no estado seco para as amostras destinadas ao ensaio com a sonda de superfície

Designação	Aerogel/pó (em massa)	Massa Volúmica (ρ) (kg/m ³)	Δ (%)	δ (%)
A ^{EPS}	0	209,89	-	2,9
A ^{EPS+Ag}	1,00	135,22	35,57	3,6

Legenda: ρ - massa volúmica aparente; Δ - variação da argamassa A^{EPS+Ag} face à argamassa A^{EPS}; δ - Variação face ao estado endurecido em equilíbrio com o ambiente

Tabela 4.14: Massa volúmica aparente no estado seco para os provetes destinados ao ensaio com a sonda de agulha

Designação	Aerogel/pó (em massa)	Massa Volúmica (ρ) (kg/m ³)	Δ (%)	δ (%)
A ^{EPS}	0	221,17	-	3,56
A ^{EPS+Ag}	1,00	133,33	39,72	3,7

Legenda: ρ - massa volúmica aparente; Δ - variação da argamassa A^{EPS+Ag} face à argamassa A^{EPS}; δ - Variação face ao estado endurecido em equilíbrio com o ambiente

Tabela 4.15: Massa volúmica aparente no estado seco para os provetes destinados ao ensaio HFM1

Designação	Aerogel/pó (em massa)	Massa Volúmica (ρ) (kg/m ³)	Δ (%)	δ (%)
A ^{EPS}	0	214,56	-	3,3
A ^{EPS+Ag}	1,00	114,33	46,71	4,22

Legenda: ρ - massa volúmica aparente; Δ - variação da argamassa A^{EPS+Ag} face à argamassa A^{EPS}; δ - Variação face ao estado endurecido em equilíbrio com o ambiente

Conhecendo os valores da massa volúmica aparente para o estado endurecido seco torna-se possível determinar o teor de água para cada estado de humidade relativa.

4.4.2 Coeficiente de condutibilidade térmica

Para os ensaios de condutibilidade térmica no estado endurecido seco foram utilizados três tipos de provetes diferentes, os produzidos para o ensaio com o equipamento *ISOMET* (sonda de agulha e de superfície) e para o ensaio HFM1, equipamento *Rapid K*. Os provetes para o ensaio HFM2 não foram ensaiados no estado endurecido seco por limitações de disponibilidade de espaço e de tempo. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabela 4.16 a Tabela 4.18.

Como seria expectável os resultados obtidos para o estado seco têm valores mais baixos do que os do estado endurecido, tendo esta variação sido entre 3 e 17%. E assim encontram-se mais próximos do valor declarado pelo fabricante (0,042 W/m.K), no entanto na ficha técnica não são referidas as condições para as quais o valor foi determinado, nomeadamente quando à temperatura e ao teor de água das amostras ensaiadas.

Tabela 4.16: Coeficiente de condutibilidade térmica no estado seco para as amostras destinadas ao ensaio com a sonda de superfície

Designação	λ (W/m.K)	Média	λ_{23°	Desvio Padrão	Δ (%)	δ (%)
A ^{EPS}	0,0517	0,0513	0,0518	0,00033	-	4,47
	0,0509					
	0,0513					
A ^{EPS+Ag}	0,0396	0,0396	0,0399	0,00005	22,87	3,42
	0,0395					
	0,0396					

Legenda: λ - coeficiente de condutibilidade térmica; σ - desvio padrão; Δ - Variação face à argamassa A^{EPS}; δ - Variação face ao estado endurecido em equilíbrio com o ambiente; λ_{23° - coeficiente de condutibilidade térmica corrigido para a temperatura de 23°C

Para os resultados obtidos para a argamassa A^{EPS+Ag} com a sonda de superfície a variação do estado endurecido seco face ao estado endurecido é muito pequena na ordem dos 3%. No entanto este valor é justificado pelo facto dos resultados se encontrarem no limite inferior da respetiva sonda (0,04 W/m.K).

Tabela 4.17: Coeficiente de condutibilidade térmica no estado seco para os provetes destinados ao ensaio com a sonda de agulha

Designação	λ (W/m.K)	Média	λ_{23°	Desvio Padrão	Δ (%)	δ (%)
A ^{EPS}	0,0547	0,0557	0,0562	0,00140	-	3,63
	0,0548					
	0,0577					
A ^{EPS+Ag}	0,0331	0,0321	0,0324	0,00117	42,34	8,19
	0,0305					
	0,0328					

Legenda: λ - coeficiente de condutibilidade térmica; σ - desvio padrão; Δ - Variação face à argamassa A^{EPS}; δ - Variação face ao estado endurecido em equilíbrio com o ambiente; λ_{23° - coeficiente de condutibilidade térmica corrigido para a temperatura de 23°C

Tabela 4.18: Coeficiente de condutibilidade térmica no estado seco para os provetes destinados aos ensaios HFM1

Designação	λ (W/m.K)	Média	λ_{23°	Desvio Padrão	Δ (%)	δ (%)
A ^{EPS}	0,0556	0,0557	0,0529	0,00186	-	16,71
	0,0581					
	0,0533					
A ^{EPS+Ag}	0,0291	0,0291	0,0277	-	47,72	5,52

Legenda: λ - coeficiente de condutibilidade térmica; σ - desvio padrão; Δ - Variação face à argamassa A^{EPS}; δ - Variação face ao estado endurecido em equilíbrio com o ambiente; λ_{23° - coeficiente de condutibilidade térmica corrigido para a temperatura de 23°C

Já para o ensaio HFM1, a variação face ao estado endurecido para a argamassa A^{EPS} foi elevada (17%). No entanto os resultados para o estado endurecido foram eles próprios muito elevados, saindo do padrão dos métodos estacionários, ou seja, esta variação vem evidenciar que os resultados obtidos por este método para esta argamassa no estado endurecido aos 28 dias foram elevados.

Apenas para a argamassa A^{EPS+Ag} se verifica uma menor, ainda que significativa, diferença entre os resultados obtidos para o estado endurecido seco face ao estado endurecido pelos equipamentos Rapid K e ISOMET. O que fundamentaria a hipótese de que durante os ensaios dos métodos estacionários as amostras sofrerem algum nível de secagem. No entanto, os ensaios pelo método HFM1 têm uma duração muito inferior aos ensaios pelo método HFM2, ou seja, nesses seria possível tirar mais algumas conclusões.

No entanto, na Figura 4.3 é possível observar-se a comparação dos resultados obtidos para a condutibilidade térmica dos diferentes métodos utilizados. Verifica-se que, para o estado seco, os resultados obtidos para os métodos estacionários se encontram mais próximos dos métodos transientes, quando comparados com o estado endurecido aos 28 dias.

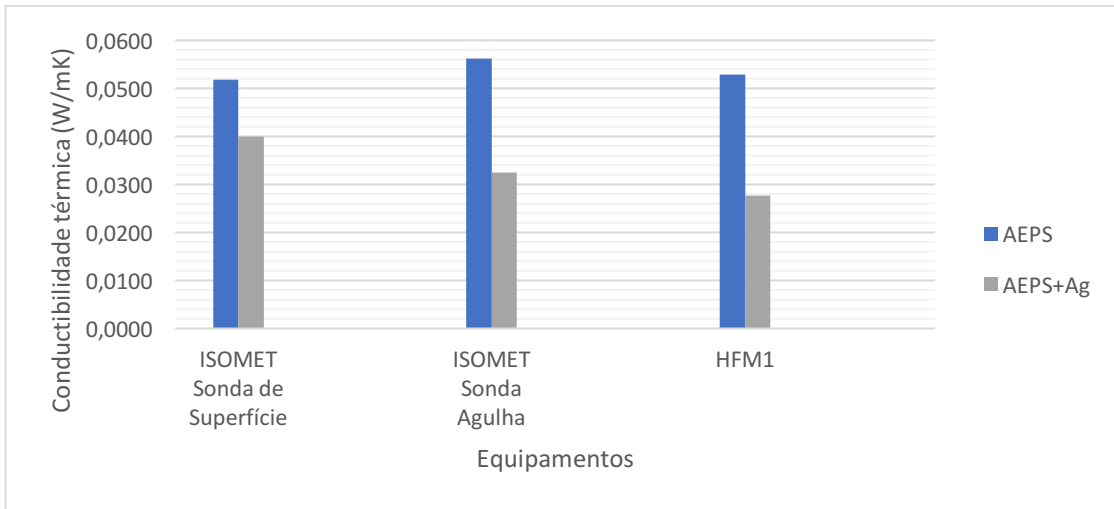


Figura 4.3: Comparação dos resultados obtidos para os diferentes métodos utilizados para o estado endurecido seco.

É necessário referir que, devido à sua elevada fragilidade e geometria ($300 \times 300 \times 27 \text{ mm}^3$), o provete da argamassa $A^{\text{EPS+Ag}}$ destinado ao ensaio HFM1 partiu-se nos seus cantos antes da secagem, no entanto o ensaio foi realizado com todas as partes montadas. Uma vez que o equipamento mede um fluxo de calor para um quadrado de $100 \times 100 \text{ mm}^2$ no centro do provete e nessa secção o mesmo se encontrava intacto, espera-se que os resultados tenham uma fiabilidade muito próxima. No entanto, de forma a garantir que o fluxo de calor não seria desviado para as zonas onde não existisse material toda a amostra foi colocada no equipamento. Na Figura 4.4 pode observar-se as diferentes peças.

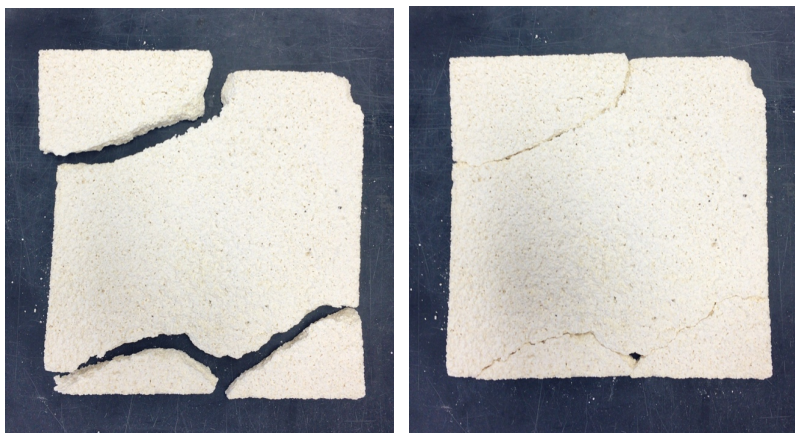


Figura 4.4: Provette destinado ao ensaio HFM1 após fissuração

A influência do aerogel na massa volúmica e na condutibilidade térmica é mais evidente para o estado endurecido seco do que para o estado endurecido aos 28 dias. Isto deve-se à presença da água no estado endurecido aos 28 dias, que atua como elemento comum e faz com as variações não sejam tão evidentes, conforme resultados apresentados na

Tabela 4.19. Para a massa volúmica, esta tendência verifica-se para todos os provetes, no entanto para a condutibilidade térmica tal já não acontece. Isto deve-se, em primeiro lugar, ao facto de os resultados para os ensaios com a sonda de superfície estarem no limite inferior da mesma, pois o valor real de condutibilidade da argamassa A^{EPS+Ag} é inferior a este (0,04W/m.K), ou seja, esta variação não tem valor expressivo para esta avaliação. Para o ensaio HFM1 a variação revelou-se superior para o estado endurecido aos 28 dias. No entanto, como referido no subcapítulo anterior, os resultados obtidos por este ensaio para a argamassa A^{EPS} apresentaram valores considerados elevados e possivelmente fora da realidade. A somar a isto o facto de a amostra de A^{EPS+Ag} se ter partido pode também ter influenciado ligeiramente os resultados. Assim, para a análise comparativa do efeito da introdução do aerogel na condutibilidade térmica para os dois estados apenas se consideram os resultados obtidos para os ensaios realizados com a sonda de agulha. O que permite concluir, como seria de esperar, que o teor de água influencia estas duas características positivamente, ou seja aumentando o seu valor.

Tabela 4.19: Influência da introdução de aerogel na massa volúmica e na condutibilidade térmica.

Δ (%)		Estado endurecido aos 28 dias	Estado endurecido seco
Massa volúmica	Provetes sonda superfície	35,11%	35,57%
	Provetes sonda agulha	39,63%	39,72%
	Provetes HFM1	46,20%	46,71%
Condutibilidade térmica	Provetes sonda superfície	23,71%	22,87%
	Provetes sonda agulha	39,48%	42,72%
	Provetes HFM1	53,92%	47,72%

4.5 CORRELAÇÕES

4.5.1 Condutibilidade térmica em função do teor de água

Uma vez que um dos objetivos passou também pela validação da utilização da sonda de agulha do equipamento ISOMET e pelo facto de este ser um método mais expedito utilizou-se este método para as correlações analisadas.

Os provetes foram colocados em câmara húmida e ensaiados de 2 em 2 dias para obtenção de diferentes teores de água. Os pontos representados no Figura 4.5. são

correspondentes ao estado endurecido seco (teor de água igual a zero), para o estado endurecido aos 28 dias em equilíbrio com o ar ambiente em condições controladas de humidade e temperatura e para 3 teores de água obtidos pela colocação dos provetes em câmara húmida.

Como é expectável, verifica-se que o valor do coeficiente de condutibilidade térmica aumenta com o aumento do teor de humidade das amostras. Confirma-se que as duas argamassas, A^{EPS+Ag} e A^{EPS} , têm sensivelmente a mesma suscetibilidade ao teor de água, uma vez que apresentam curvas paralelas, ou seja, a introdução de aerogel não provocou alterações nesta característica.

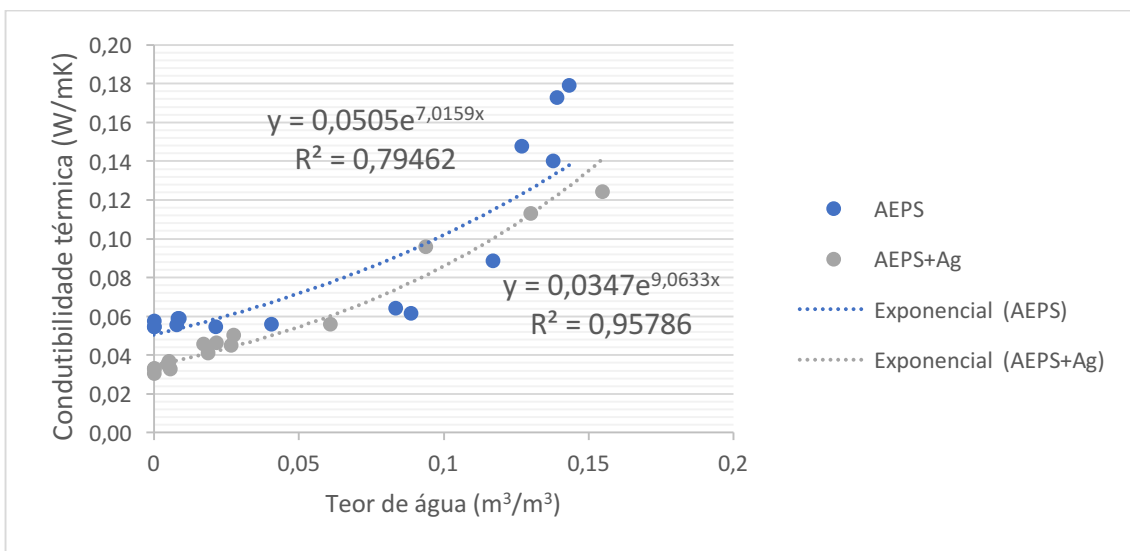


Figura 4.5: Correlação do coeficiente de condutibilidade térmica em função do teor de água das amostras. Para o fator exponencial obteve-se o valor de 7,02 e de 9,06, para as argamassas A^{EPS} e A^{EPS+Ag} , respetivamente, que é sensivelmente o dobro do fator indicado pela norma ISO 10456 (2007), 4, e do determinado experimentalmente pelo estudo (Gomes et al., 2016), que foi de 4,24. É de referir que o método utilizado foi diferente, ou seja, as amostras foram primeiro secas e depois colocadas em ambiente húmido.

É de referir que as amostras da argamassa A^{EPS+Ag} apresentam muita fragilidade e que com o manuseamento foram perdendo massa, o que pode afetar os resultados especialmente no que diz respeito ao teor de água uma vez que este depende diretamente da massa medida em cada pesagem, ou seja, para cada ponto de humidade, o teor de água determinado pode ser ligeiramente inferior ao teor de água real.

4.5.2 Coeficiente de condutibilidade térmica em função da massa volúmica aparente

Analisou-se também a relação entre a massa volúmica aparente e o coeficiente de condutibilidade térmica, tendo-se obtido, como esperado, que este aumenta para maiores valores de massa volúmica. Para esta relação utilizaram-se os valores obtidos para os ensaiados à massa volúmica aparente para o estado endurecido. No é possível verificar que se encontram duas concentrações de pontos, uma é referente à argamassa A^{EPS} e ou para a argamassa A^{EPS+Ag} . Nas Figuras 4.6 e 4.7 observam-se os gráficos desta relação para cada uma das argamassas.

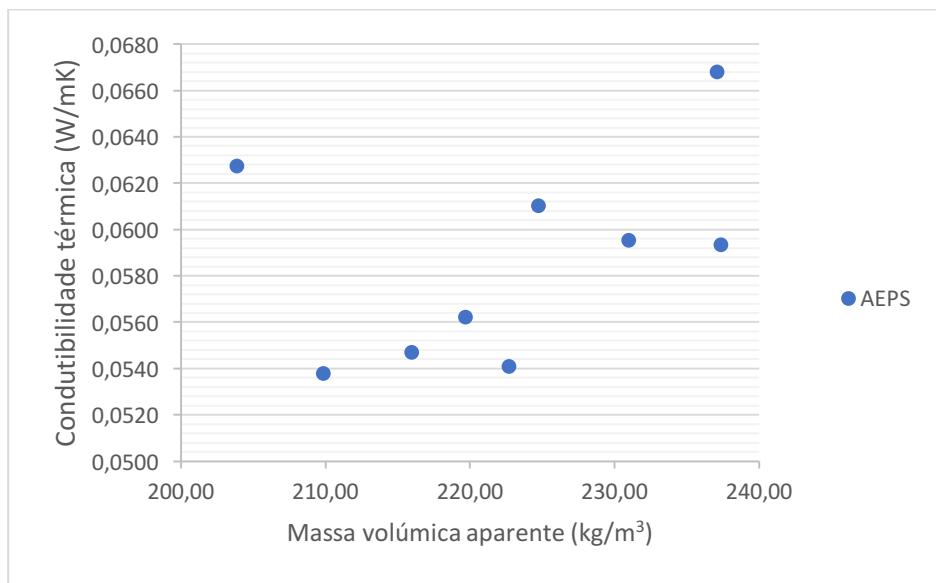


Figura 4.6: Relação entre a massa volúmica e a condutibilidade térmica dos provetes da argamassa A^{EPS}

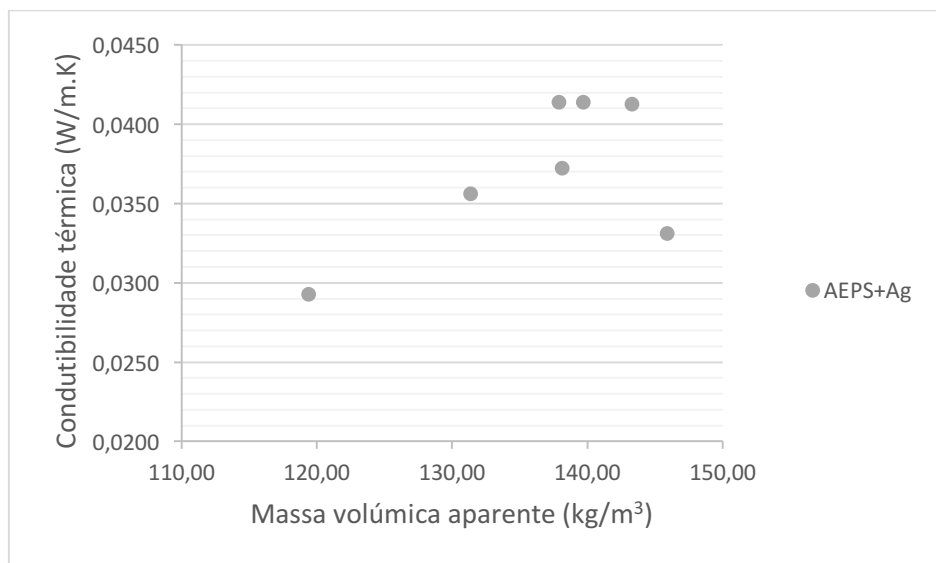


Figura 4.7: Relação entre a massa volúmica e a condutibilidade térmica dos provetes da argamassa A^{EPS+Ag} .

4.5.3 Capacidade calorífica volumétrica em função do teor de água

Com o equipamento ISOMET foi também possível medir a capacidade calorífica volumétrica, c_p ($\text{J}/\text{m}^3\cdot\text{K}$).

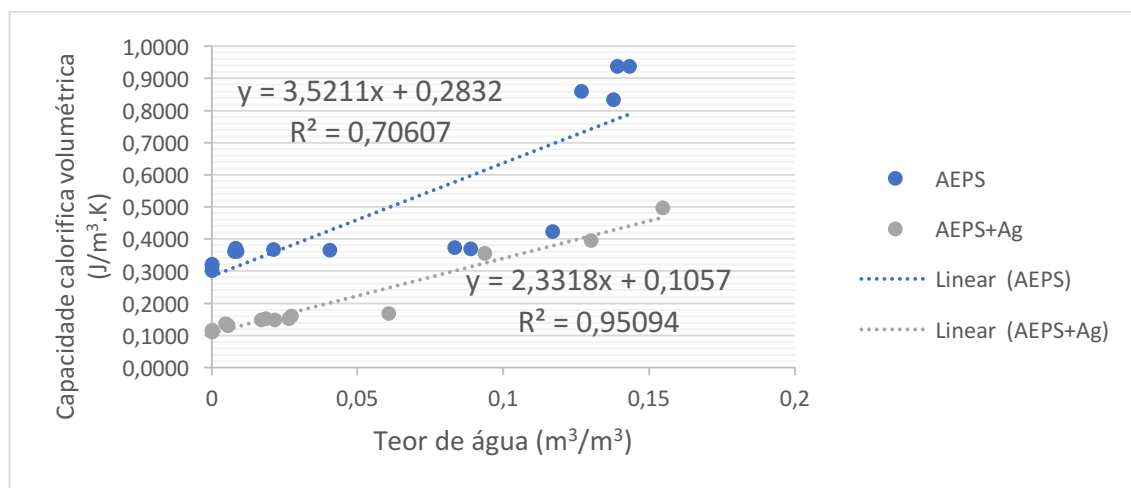


Figura 4.8: Capacidade térmica volumétrica em função do teor de água dos provetes.

Na Figura 4.8 é possível observar estes resultados. Como seria espectável a capacidade calorífica volumétrica aumenta com o teor de água, ou seja, esta característica é suscetível ao teor de água. Para além disso, verifica-se também que a argamassa A^{EPS} é mais suscetível a esta característica, uma vez que apresentam uma reta de regressão com maior declive. O que permite concluir também que a introdução de aerogel fez diminuir a suscetibilidade deste material ao teor de água quanto à sua capacidade calorífica volumétrica.

4.6 SÍNTESE DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados todos os resultados do estudo realizado, obtidos pelos cinco tipos de ensaio diferentes de medição do coeficiente de condutibilidade térmica. A sonda de superfície do equipamento ISOMET verifica-se inadequada para a argamassa com introdução de aerogel, uma vez que se obteve um material com condutibilidade muito baixa, com valores inferiores ao limite desta sonda.

Verificou-se que não só as características do material como a massa volúmica aparente, como também as condições de ensaio nomeadamente o teor de água e a temperatura influenciam os resultados obtidos.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

O presente trabalho incidiu sobre a determinação da condutibilidade térmica de argamassas térmicas utilizando-se, para este efeito, 5 diferentes métodos de medição. Foi assim possível comparar os resultados obtidos com os diversos métodos, para 2 argamassas térmicas diferentes e 5 tipos de provetes, e avaliar a influência da temperatura e do teor de água dos provetes. Foi também possível avaliar a influência do aerogel nestas características.

Conclui-se que, pela utilização dos diferentes métodos, se obtêm valores muito diferentes para o valor do coeficiente de condutibilidade térmica, e que fatores como a massa volúmica aparente ou o teor de água influenciam muito o valor deste coeficiente.

Tal como esperado, a massa volúmica aparente (ρ) influencia a condutibilidade térmica do material. Para materiais com massas volúmicas mais baixas obtêm também condutibilidades térmicas mais baixas. Relativamente ao teor de água (Ψ) também se verifica que influencia a condutibilidade térmica destes materiais, apresentando diferentes condutibilidades térmicas quando expostos a diferentes teores de água. Amostras com teores de água mais elevados apresentam condutibilidades térmicas mais elevadas, ou seja, pior comportamento térmico. Estas conclusões são consistentes com resultados obtidos em estudos anteriores (Gomes et al., 2017).

A introdução de aerogel fez reduzir a trabalhabilidade da argamassa o que levou à necessidade de adição de mais água, ou seja, obteve-se um rácio água/pó superior para a argamassa com adição de aerogel. A introdução deste material fez também baixar a massa volúmica aparente da argamassa, tendo-se obtido $132,67 \text{ kg/m}^3$ para a argamassa com aerogel e $222,45 \text{ kg/m}^3$ para a argamassa sem aerogel, o que representa um decréscimo de 40% para a introdução de 100% de aerogel em massa. Quanto à condutibilidade térmica obtiveram-se valores entre $0,0495$ e $0,0584 \text{ W/m.K}$ para a argamassa sem aerogel e entre $0,0267$ e $0,0372 \text{ W/m.K}$ para a argamassa com aerogel, o que representa em média um decréscimo de 42%.

A incorporação de aerogel aumenta muito a fragilidade da argamassa, apresentando perdas de massa pelo manuseamento das mesmas, esta propriedade apresenta ainda mais evidência para o estado seco.

Conclui-se que a introdução de aerogel em argamassas industriais de desempenho térmico melhorado faz melhorar o seu comportamento térmico, baixando o coeficiente de condutibilidade térmica e reduzindo também a massa volúmica destas argamassas.

Relativamente à introdução de aerogel verifica-se ainda que faz aumentar a necessidade de água da mistura, fazendo aumentar o rácio água/pó, para o qual foi obtido o valor de 1,85.

Levanta-se a hipótese de que, possivelmente, as amostras utilizadas nos ensaios com os equipamentos que utilizam métodos estacionários realizados aos 28 dias para amostras em equilíbrio com o ambiente, na realidade, têm valores de teor de água para um estado intermédio entre esse estado e o estado seco, pelo facto desses ensaios serem demorados (entre 2h e 12h) e realizados para temperaturas médias mais elevadas (40°C e 47,5°C) do que os ensaios com métodos transientes.

Verifica-se que todos os resultados obtidos em laboratório pelos diferentes métodos de medição para o coeficiente de condutibilidade térmica são superiores ao valor declarado pelo fabricante na ficha técnica do produto.

Por fim, é importante referir que, não só os valores declarados pelos fabricantes como os resultados de estudos científicos carecem de informação, nomeadamente quanto às condições de temperatura e teor de água a que são declarados, e também quanto aos métodos que foram utilizados nas medições dos mesmos.

5.1 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

De modo a complementar as conclusões retiradas neste estudo propõe-se que sejam realizados outros estudos com mais amostras e com maior número de métodos de medição do coeficiente de condutibilidade térmica. Deverá ainda ser estudada a massa volúmica aparente antes e depois dos ensaios, no caso da utilização de métodos estacionários, e avaliar se existe ou não uma perda de teor de água durante estes ensaios. Em qualquer dos casos, uma vez que para os métodos estacionários o cálculo do valor do coeficiente de condutibilidade térmica é um processo iterativo e o valor final corresponde à situação final de regime estacionário, o resultado obtido corresponde às condições finais

do ensaio, propõe-se que a massa volúmica dos provetes seja determinada logo após os ensaios com estes métodos.

Seria interessante fazer esta mesma análise comparativa para mais argamassas, para assim se poderem efetuar correlações entre os diferentes métodos.

6 REFERÊNCIAS

- Achard P., Rigacci A., Echantillac T., Bellet A., Aulagnier M., Daubresse A.** - Enduit isolant à base de xerogel de silice, WIPO Patent WO/083174, (2011)
- Aegerter, MA.; Leventis, N.; Koebel, MM.** – Aerogels handbook, edited by Springer Science + Business Media, New York (2011)
- Aneli, S.; Gagliano, A.; Nocera, F.** - Thermodynamic analysis of ventilated façades under different wind conditions in summer period. *Energy and Buildings*, 122 (2016) pp. 131-139.
- Applied Precision Ltd.**, Isomet 2114 Thermal properties analyzer user's guide, Version 120712.
- Arandigoyen M., Alvarez J. I.** - Blended pastes of cement and lime: pore structure and capillary porosity, *Appl. Surf. Sci.* 252 (2006) pp. 8077–8085.
- Arandigoyen M., Álvarez J.I.** - Pore structure and mechanical properties of cement-lime mortars, *Cem. Concr. Res.* 37 (2007) pp. 767–775.
- ASTM C518** – “Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus”. American Society for Testing and Materials, (2010)
- Baetens R., Jelle B. P., Gustavsen A.** - Aerogel insulations for building applications: a state-of-the-art review, *Energy and Buildings* 43 (2011) pp. 761 - 769
- Brás A., Leal M., Faria P.** - Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement - EPS mortars performance, *Construction and Building Materials* 49 (2013) pp. 315-327
- Brás A., Leal M., Faria P.** - Argamassas com comportamento térmico melhorado com materiais sustentáveis, CRSEEL 2012, 2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono, Monte da Caparica, 26-27 Abril 2012
- Buratti C., Moretti E.** - Experimental performance evaluation of aerogel glazing systems, *Appl Energy* 97, (2012), pp. 430-437
- Callister Jr., William D.** - An introduction, John Wiley & Sons, INC, Materials, Science and Engineering, (2003)

CEN EN 998-1 – Specifications for Mortar for Masonry – Part 1: Rendering and Plastering Mortar. European Committee for Standardization, Brussels, (2010)

CEN EN 1015-10 – Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar, European Committee for Standardization, Brussels, (1999)

CEN EN 1015-11 – Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, European Committee for Standardization, Brussels, (1999)

Comini R., Clement F., Puente F., Orlandi A., Oliveira I., Lima P., Beirão D. - Eficiência energética nos edifícios residenciais – Manual do consumidor, (2008)

Cotana F., Pisello A.L., Moretti E., Buratti C. - Multipurpose characterization of glazing systems with silica aerogel: in-field experimental analysis of thermal-energy, lighting and acoustic performance, *Building and Environment*, 81, (2014), pp. 92-102

Cuce E., Cuce P.M., Wood C.J., Riffat S.B. - Optimizing insulation thickness and analyzing environmental impacts of aerogel-based thermal superinsulation in buildings, *Energy and Buildings*, 77 (2014), pp. 28 - 39

Fidalgo A., Farinha J. P. S., Martinho J. M. G., Ilharco L. M. - Flexible hybrid aerogels prepared under subcritical conditions, *Journal of Materials Chemistry A*, 1 (2013) pp. 12044 – 12052

Flores Colen, I. (2009) - “Metodologia de avaliação do desempenho em serviço de fachadas rebocadas na óptica da manutenção predictiva”. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Lisboa, Instituto Superior Técnico, pp. 487

Fourmentin M., Faure P., Gauffinet S., Peter U., Lesueur D., Daviller D., Ovarlez G., Cousot P. - Porous structure and mechanical strength of cement-lime pastes during setting, *Cem. Concr. Res.* 77 (2015) pp. 1-8

Franco, A. - An apparatus for the routine measurement of thermal conductivity of materials for building application based on a transient hot-wire method, *Applied Thermal Engineering* 27 (2007) pp. 2495–2504

Glória Gomes M., Flores-Colen I., Manga L. M., Soares A., Brito J. - The influence of moisture content on the thermal conductivity of external thermal mortars, *Construction and Building Materials* 135 (2017) pp. 279 - 286

Gonçalves T. - Salt crystallization in plastered or rendered walls - PhD thesis. LNEC and Instituto Superior Técnico (IST), (2007)

Gonçalves MC, Margarido F. - Nanomateriais. Ciência e Energia de Materiais de Construção., IST Press (2012), pp. 727-771.

Holometrix, Operation & maintenance manual of Holometrix model Rapid-k - heat flow meter thermal conductivity instrument, Bedford, MA.

Ibrahim M., Biwole P.H., Achard P., Wurt E. - Aerogel-based materials for improving the building envelope's thermal behavior: A brief review with a focus on a new aerogel-based rendering, Energy Sustainability Through Green Energy, (2015) 163-188

ISO 10456 - Building Materials and Products – Hygrothermal Properties – Tabulated Design Values and Procedures for Determining Declared and Design Thermal Values, International Organization for Standardization, Switzerland, (2007)

ISO 8301 - "Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Heat flow meter apparatus", (1998)

Kherdmand M., Azenha M., Aguiar J., Castro-Gomes J. - Experimental and numerical studies of hybrid PCM embedded in plastering mortar for enhanced thermal behavior of buildings, Energy 94 (2016) pp. 250-261

Kim S., Seo J., Cha J. - Chemical retreating for gel-typed aerogel and insulation performance of cement containing aerogel, Construction and Building Materials, 40, (2013), 501 - 505

Leal M. M. R. - Desenvolvimento de argamassas de revestimento com desempenho térmico melhorado – Dissertação de Mestrado - Instituto Politécnico de Setúbal, (2012), pp. 144

Lucas S., Cunha S., Rucek M., Aguiar J., Ferreira V. L. - Argamassas Térmicas à base de Cal, 6º congresso Luso-Moçambicano de engenharia, CLME (2011)

Melo H. - Caracterização experimental do comportamento físico de argamassas de desempenho térmico melhorado – Dissertação de Mestrado – Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa (2014)

NP EN 12667 - "Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance". (2007)

Oliveira H., Torgal F., Bragança L. - Alguns Contributos da Nanotecnologia para a Sustentabilidade dos Materiais de Construção, CINCOS'12 - Congresso de Inovação na Construção Sustentável - Plataforma para a Construção Sustentável (2012)

Real S., Gomes M. G., Rodrigues A. M., Bogas J. A. - Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings, *Construction and Building Materials* 121 (2016) pp. 460 - 470

Reim M., Beck A., Korner W., Petricevic R., Glora M., Weth M., Schliermann T., Fricke J., Schmidt C.H., Potter F.J. - Highly insulation aerogel glazing for solar energy use, *Solar Energy*, 72, (2002) pp. 21 - 29

Silva A., Soares A., Flores-Colen I., Brito J. - "Mechanical Characteristics of Lightweight Mortars on Small-Scale Samples", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 44, No. 1, (2016), pp. 402–413

Soares A., Júlio M., Flores-Colen I., Ilharco L., de Brito J., Gaspar Martinho J. - Resistência à água de argamassas com incorporação de agregados leves, (2014)

Soares A., Flores-Colen I., Brito J. - A nanotecnologia aplicada a argamassas de revestimento, *Tech Lett*, 11, (2013), pp. 1645 - 5576

Sousa G. – Influência de aerogel no comportamento físico de argamassas térmicas – Dissertação de Mestrado – Instituto Superior Técnico – Universidade de Lisboa (2017)

Stahl Th., Brunner S., Zimmermann M., Wakili K. G. - Thermo-hygric properties of a newly developed aerogel based insulation rendering for both exterior and interior applications, *Energy and Buildings* 44, (2012), pp. 114 - 117

Torres M.L., García-Ruiz P.A. - Lightweight pozzolanic materials used in mortars: Evaluation of their influence on density, mechanical strength and water absorption. *Cem. Concr. Compos.*, 31, (2009), pp. 114-119

Weber Saint-Globain (2017) – Ficha Técnica weber.therm aislone, Portugal.

Ximenes S., Silva A., Soares A., Flores-Colen I., Brito J. - Parametric analysis to study the influence of aerogel-based renders components on thermal and mechanical performance, *Materials* 9 (2016) pp. 336

Zhu, W.; Bartos, PjM; Porro, A. – Application of nanotechnology in construction – Summary of a state-of-the-art report. RILEM TC 197-NCM: Nanotechnology in construction materials. *Mater. and Struc.*, 37, (2004), pp. 649 - 658

Referências de internet:

[W1]

http://www.aerogel.com/_resources/common/userfiles/file/Data%20Sheets/Spaceloft-European-Datasheet-EN.pdf, consultado de Maio de 2017

[W2] - http://www.starch.dk/private/energy/img/Spaceloft_DS.pdf, consultado em Maio de 2017

W3 - <http://www.buyaerogel.com>, consultado em Maio de 2017

W4 - <https://www.greentechmedia.com/articles/read/video-aerogels-and-the-energy-efficient-home>, consultado em Março de 2017

W5 <https://www.weber.com.pt/isolamento-termico-pelo-exterior/solucoes/sistemas-webertherm.html>, consultado em Abril de 2017

W6 - <https://www.beliani.pt/material-de-recheio-eps-bolas-de-poliestireno-granulado-para-puffs-300-l.html>, consultado em Março de 2017

W7 - <http://certificadoenergético.pt/10115.html>, consultado em Maio de 2017

W8 – <http://www.futureng.pt/eps>, consultado em Abril de 2017

W9 - http://ctherm.com/products/tci_thermal_conductivity/comparing_the_methods/ - consultado a Maio de 2017

W10 - <https://www.thermtest.com/thermal-conductivity-lee-s-disc>, consultado em Maio de 2017, consultado em Maio de 2017

W11 - http://www.controls-group.com/eng/scheda-print.php?id_cat=cement&id_prod=digital-mortar-mixers, consultado em Maio de 2017

ANEXOS

A1 - VALORES INDIVIDUAIS PARA A MASSA VOLÚMICA APARENTE

	Teor de água (m ³ /m ³)	Massa volúmica (kg/m ³)	Média massa volúmica	Provetes	Varição %
Estado Endurecido					
AEPS	0,0541	222,69	216,16	ISOMET S	35,11
	0,0538	209,83			
	0,0547	215,97			
AEPS+AG	0,0413	143,27	140,27		
	0,0414	137,87			
	0,0414	139,67			
AEPS	0,0595	230,96	229,32	ISOMET A	39,63
	0,0562	219,66			
	0,0593	237,33			
AEPS+AG	0,0331	145,87	138,45		
	0,0356	131,33			
	0,0372	138,14			
AEPS	0,0610	224,74	221,88	HFM1	46,20
	0,0668	237,05			
	0,0627	203,85			
AEPS+AG	0,0293	119,37	119,37		
Estado Seco					
AEPS	0	215,97	209,89	ISOMET S	35,57
	0	203,86			
	0	209,83			
AEPS+AG	0	138,11	135,22		
	0	132,87			
	0	134,68			
AEPS	0	222,71	221,17	ISOMET A	39,72
	0	212,02			
	0	228,78			
AEPS+AG	0	140,30	133,33		
	0	126,66			
	0	133,01			
AEPS	0	217,80	214,56	Rapid K	46,71
	0	228,79			
	0	197,08			
AEPS+AG	0	114,33	114,33		
Em Pasta					
AEPS	-	343,00	343,00	-	15,82
AEPS+AG	-	288,75	288,75	-	

A2 - VALORES INDIVIDUAIS PARA DIFERENTES TEORES DE ÁGUA

Estado endurecido aos 28 dias

ISOMET - A		Lamda	massa (g)	Teor A	ρ	cp
AEPS	A00	0,0590	105,85	0,0082	230,94	0,3710
	A01	0,0557	100,67	0,0076	219,64	0,3611
	A02	0,0588	108,77	0,0086	237,31	0,3603
AEPS+Ag	A10	0,0328	66,85	0,0056	145,85	0,1294
	A11	0,0353	60,19	0,0047	131,32	0,1349
	A12	0,0369	63,31	0,0051	138,13	0,1324

Estado endurecido seco

ISOMET - A		Lamda	massa (g)	ρ	cp
AEPS	A00	0,0547	102,07	222,69	0,3209
	A01	0,0548	97,17	212,00	0,3177
	A02	0,0577	104,85	228,76	0,2998
AEPS+Ag	A10	0,0331	64,30	140,29	0,1140
	A11	0,0305	58,05	126,65	0,1102
	A12	0,0328	60,96	133,00	0,1151

1º ponto após colocação em ambiente húmido

ISOMET - A		Lamda	massa (g)	Teor A	ρ	cp
AEPS	A00	0,1477	160,17	0,127	349,46	0,8595
	A01	0,0548	106,88	0,021	233,19	0,3661
	A02	0,0558	123,41	0,040	269,25	0,3640
AEPS+Ag	A10	0,0410	72,79	0,019	158,81	0,1516
	A11	0,0960	100,98	0,094	220,32	0,3539
	A12	0,0458	68,75	0,017	150,00	0,1463

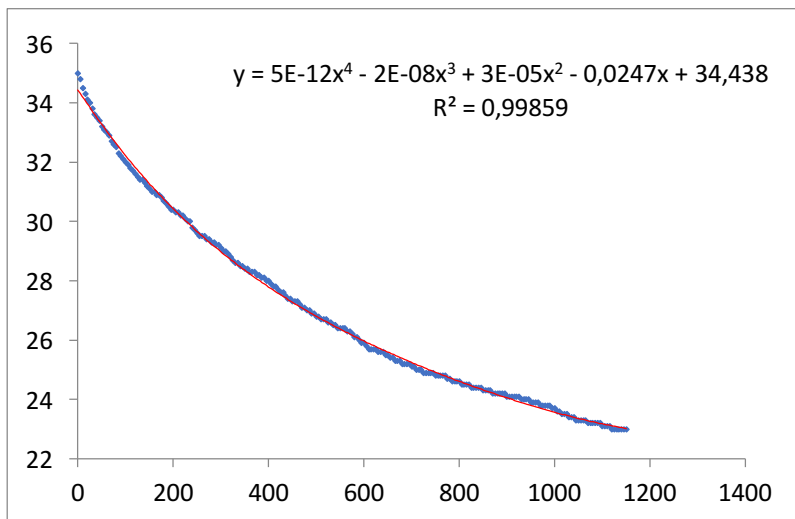
2º ponto após colocação em ambiente húmido

ISOMET - A		Lamda	massa (g)	Teor A	ρ	cp
AEPS	A00	0,1729	165,77	0,139	361,67	0,9375
	A01	0,0616	137,82	0,089	300,69	0,3692
	A02	0,0643	143,01	0,083	312,02	0,3735
AEPS+Ag	A10	0,0451	76,42	0,026	166,73	0,1516
	A11	0,1130	117,65	0,130	256,69	0,3943
	A12	0,0465	70,82	0,022	154,51	0,1469

3º ponto após colocação em ambiente húmido

ISOMET - A		Lamda	massa (g)	Teor A	ρ	cp
AEPS	A00	0,1790	167,71	0,143	365,91	0,9375
	A01	0,1402	160,27	0,138	349,67	0,8336
	A02	0,0885	158,39	0,117	345,57	0,4217
AEPS+Ag	A10	0,0560	92,15	0,061	201,05	0,167
	A11	0,1242	128,95	0,155	281,34	0,4959
	A12	0,0504	73,49	0,027	160,34	0,1597

A3 - CÁLCULOS INTERMÉDIOS MÉTODO DISCO DE LEE



Intersecção da tangente

temperatura (°C) 30,1
 tempo (s) 985