

INFLUÊNCIA DE AEROGEL NO COMPORTAMENTO FÍSICO DE ARGAMASSAS TÉRMICAS

Gonçalo Pedroso de Sousa

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Engenharia Civil

Orientadores: Prof.^a Inês dos Santos Flores Barbosa Colen
Dr. Luís Miguel Cardoso da Silva

Júri

Presidente: Prof^o Albano Luís Rebelo da Silva das Neves e Sousa

Orientador: Prof^a Inês dos Santos Flores Barbosa Colen

Vogal: Prof^a Maria da Glória de Almeida Gomes

Maio de 2017

Agradecimentos

Para a realização desta dissertação de mestrado contei com o apoio de várias pessoas, que permitiram que tudo isto fosse possível e aos quais estarei eternamente grato. Gostaria de enumerar algumas dessas pessoas, de modo agradecer-lhes a ajuda e motivação.

Em primeiro lugar, queria agradecer de um modo muito especial aos meus orientadores, Prof. Inês Flores-Colen e Eng. Luís Silva, por toda a ajuda, paciência e disponibilidade demonstrada sempre que necessitei.

Ao Eng. António Soares, bolsheiro de investigação IST, pelo apoio e conhecimentos técnicos partilhados que me ajudaram bastante nesta investigação.

Ao senhor Leonel Silva e ao Eng. Pedro Sanches do Laboratório de Construção do Instituto Superior Técnico, à Prof. Paulina Faria e ao Eng. Vítor Silva do Laboratório da Faculdade de Ciências e Tecnologia, pelo apoio dado durante os ensaios efetuados no âmbito deste trabalho de investigação e à Universidade de Aveiro por se disponibilizar para a realização de ensaios.

À empresa Weber Saint Gobain pela facultação das argamassas industriais necessárias.

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

A todos os meus amigos que me acompanharam ao longo destes 5 anos e à minha namorada, que me ajudaram e motivaram a terminar esta importante etapa da minha vida.

E por último, mas muito importante, à minha família por tudo o que me deram até hoje, por me ensinarem o que é a vida e fazerem de mim a pessoa que me tornei. Muito Obrigado!

Resumo

Atualmente, com uma maior exigência por parte da população no que respeita à eficiência energética dos edifícios, o mercado de construção tem-se adaptado, resultando materiais isolantes, tais como as argamassas térmicas, que incluem na sua constituição agregados (como o EPS e a cortiça), na procura de um melhor desempenho térmico. Apesar de os resultados obtidos se terem revelado satisfatórios, a comunidade científica tem explorado outro tipo de agregados isolantes com melhores características térmicas, de modo a melhorar o desempenho térmico destas argamassas. É neste seguimento que surgem os nanomateriais e consequentemente o aerogel de sílica, como agregado introduzido nas argamassas térmicas.

Neste trabalho experimental realizou-se o estudo da influência da adição de granulado de aerogel de sílica (com diferentes %) em duas argamassas industriais, constituídas por agregados leves de EPS e de Perlite respetivamente. Caracterizou-se a massa volúmica aparente no estado fresco e, no estado endurecido, a massa volúmica aparente, a condutibilidade térmica, a resistência à compressão e o módulo de elasticidade dinâmico.

Como resultado deste estudo, a introdução de aerogel alterou o desempenho das argamassas tornando-as menos compactas, melhores termicamente, menos resistentes e com maior capacidade de deformação. Para percentagens de aerogel superiores a 100% da massa da argamassa industrial em pó, obteve-se: massas volúmicas aparentes entre 100-150 kg/m³ (reduções de 40 a 55%); condutibilidades térmicas inferiores a 0,03 W/m.K (decréscimos de 50 a 60%); resistências à compressão reduzidas e inferiores a 0,1 MPa (diminuição de 60 a 85%); e diminuições do módulo de elasticidade dinâmico superiores a 90%.

Palavras-chave: argamassas térmicas; agregados leves; aerogel; condutibilidade térmica; resistência à compressão.

Abstract

With the increased demand for superior energy efficiency of buildings, the construction industry has had to adapt through pioneering new and improved technology and insulating materials such as thermal mortars, who are comprised of lightweight aggregates (such as EPS and cork), in search of better thermal performance. Although the results obtained from the aforementioned studies have been deemed satisfactory, the scientific community has been exploring other types of insulation aggregate with better thermal properties, with the ultimate goal of improving the thermal performance of these mortars. It is in this follow-up that the nanomaterials, and consequently the silica aerogel, are discussed as an additional aggregate to the thermal mortars.

In this experimental work the influence of silica aerogel was studied (with varying percentages) on two industrial mortars, made up of lightweight aggregates of EPS and Perlite respectively. The following properties were studied: the bulk density in the fresh state and, in the hardened state, the bulk density, the thermal conductivity, the compressive strength and the dynamic modulus of elasticity.

From this study, it was determined that the introduction of aerogel changed the performance of the mortars by making them less compact, less resistant and more deformable. Furthermore, the study found that the addition of aerogel improved the thermal insulation of the mortars. For percentages of aerogel greater than 100% of the mass of the industrial mortar in powder, the results were as follows: bulk densities ranged 100-150 kg/m³ (reductions of 40-55%); thermal conductivities were lower than 0,030 W/m.K (decreases of 50-60%); compressive strengths were reduced to less than 0,1 MPa (60-85% decrease); and dynamic modulus of elasticity decreased greater than 90%.

Keywords: thermal mortars; lightweight aggregates; aerogel; thermal conductivity; compressive strength.

Índice geral

Agradecimentos	I
Resumo.....	III
Abstract	V
Índice de figuras	IX
Índice de tabelas	XI
Abreviaturas.....	XIII
Simbologia.....	XV
1 Introdução	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Objetivo e metodologia da dissertação	2
1.3 Organização e estrutura da dissertação.....	2
2 Sistemas de isolamento térmico e argamassas térmicas.....	5
2.1 Considerações iniciais	5
2.2 Enquadramento.....	5
2.3 Sistemas de desempenho térmico melhorado	8
2.3.1 Revestimentos de desempenho térmico melhorado.....	8
2.3.2 Argamassas de desempenho térmico melhorado	11
2.4 Materiais constituintes de argamassas térmicas	14
2.4.1 Ligantes	15
2.4.2 Agregados leves e isolantes	16
2.5 Aerogel de sílica como material isolante	19
2.5.1 Aerogel de sílica como agregado	19
2.5.2 Sistemas de isolamento compostos por aerogel	21
2.6 Estudos realizados em argamassas de desempenho térmico melhorado.....	22
2.6.1 Argamassas térmicas industriais	22
2.6.2 Argamassas térmicas compostas por aerogel.....	25
2.7 Síntese do capítulo	28
3 Caracterização do trabalho experimental.....	31
3.1 Considerações gerais.....	31
3.2 Descrição do plano de ensaios.....	31
3.3 Caracterização dos materiais constituintes das argamassas	35
3.3.1 Argamassa industrial <i>AEPS</i>	35
3.3.2 Argamassa industrial <i>APerlite</i>	35

3.3.3	Aerogel de sílica	36
3.4	Produção das argamassas	37
3.5	Caracterização das argamassas em estado fresco	38
3.5.1	Massa volúmica aparente da argamassa em pasta.....	38
3.6	Caracterização das argamassas em estado endurecido.....	39
3.6.1	Massa volúmica aparente da argamassa endurecida	39
3.6.2	Ensaio à condutibilidade térmica da argamassa endurecida	40
3.6.3	Ensaio à resistência mecânica da argamassa endurecida	43
3.6.4	Ensaio ao módulo de elasticidade dinâmico da argamassa endurecida	44
3.7	Síntese do capítulo	45
4	Apresentação e discussão de resultados	49
4.1	Considerações gerais.....	49
4.2	Caracterização das argamassas no estado fresco	49
4.2.1	Adição de água e trabalhabilidade das argamassas.....	49
4.2.2	Massa volúmica aparente da argamassa em pasta.....	50
4.3	Caracterização das argamassas em estado endurecido.....	53
4.3.1	Massa volúmica aparente da argamassa endurecida	53
4.3.2	Ensaio à condutibilidade térmica das argamassas.....	56
4.3.3	Ensaio à resistência à compressão da argamassa endurecida.....	61
4.3.4	Módulo de elasticidade dinâmico e de torção	64
4.4	Correlações.....	65
4.5	Conclusões do capítulo	70
5	Conclusões e desenvolvimentos futuros.....	71
5.1	Considerações iniciais	71
5.2	Conclusões gerais	71
5.3	Propostas de desenvolvimentos futuros.....	72
	Referências bibliográficas	75
	Anexos.....	A-1
	Anexo A1 - Massa volúmica aparente.....	A-2
	Anexo A2 – Condutibilidade térmica	A-4
	Anexo A3 – Resistência à compressão	A-7
	Anexo A4 – Módulo de elasticidade e de torção	A-7

Índice de figuras

Figura 2.1 Consumo energético europeu nos diferentes sectores (Enerdata, 2012).	5
Figura 2.2 Eliminação das pontes térmicas com a instalação de isolamento térmico pelo exterior na figura da direita (Freitas <i>et al.</i> , 2005).	9
Figura 2.3 Composição por camadas do sistema de ETICS [W1].	10
Figura 2.4 Perfis e acessórios metálicos/plásticos utilizados na aplicação do sistema ETICS. Perfil de arranque, perfil de canto e bucha de fixação mecânica [W2].	11
Figura 2.5 (a) Aplicação da argamassa térmica por projecção em suporte de alvenaria; (b) Nivelamento da argamassa isolante com a régua (Gonçalves <i>et al.</i> , 2012); (c) Pormenor da camada de reforço e do reforço das singularidades (Duarte, 2017). .	13
Figura 2.6 Esquema por camadas dum sistema com argamassas térmicas [W4];	14
Figura 2.7 Granulado de poliestireno expandido (EPS) [W6].	18
Figura 2.8 Perlite expandida em diferentes tipos de granulometria, adaptado de [W7].	18
Figura 2.9 Aerogel de sílica no estado granulado e em placa [W10].	20
Figura 2.10 Mantas isolantes com aerogel na sua constituição, <i>Space/loft</i> [W11].	21
Figura 3.1 Provetes utilizados na primeira produção de argamassas.	33
Figura 3.2 Provetes utilizados na segunda produção de argamassas.	33
Figura 3.3 Provetes utilizados na terceira produção de argamassas.	34
Figura 3.4 Aerogel utilizado nas produções.	36
Figura 3.5 Mistura e preparação da argamassa (a, b) e determinação da sua densidade (c). ..	37
Figura 3.6 Preparação dos provetes.	38
Figura 3.7 Ensaio da condutibilidade térmica com a sonda de contacto e de agulha.	40
Figura 3.8 Representação esquemática do ensaio <i>HFM</i> (adaptado de Senff <i>et al.</i> , 2016).	41
Figura 3.9 Realização do ensaio da resistência à compressão.	44
Figura 3.10 Ensaio para a determinação do modo de vibração à flexão e à torção.	45
Figura 4.1 Amostra de AEps em estado fresco.	49
Figura 4.2 Variação da relação H ₂ O/Arg. industrial com o aumento da percentagem de aerogel na mistura.	50
Figura 4.3 Variação da massa volúmica aparente em pasta com a adição de aerogel na mistura.	52
Figura 4.4 Variação da massa volúmica aparente em estado endurecido com o aumento da percentagem de aerogel na mistura.	55
Figura 4.5 Variação da massa volúmica aparente em estado endurecido seco das amostras secas com o aumento da percentagem de aerogel na mistura.	56
Figura 4.6 Medição da condutibilidade térmica de uma placa de EPS.	58
Figura 4.7 Variação da condutibilidade térmica com o aumento da percentagem de aerogel no estado endurecido seco.	61
Figura 4.8 Variação da resistência à compressão com o aumento da percentagem de aerogel.	63

Figura 4.9 Variação do módulo de elasticidade dinâmico e de torção com o aumento da percentagem de aerogel nas argamassas AEps e APerlite.....	65
Figura 4.10 Correlação entre a massa volúmica aparente no estado endurecido e a relação H ₂ O/Arg. industrial.	66
Figura 4.11 Correlação entre a massa volúmica aparente e a condutibilidade térmica.	67
Figura 4.12 Correlação entre a massa volúmica aparente e a resistência à compressão.	68
Figura 4.13 Correlação entre a condutibilidade térmica e a resistência à compressão.	69
Figura 4.14 Correlação entre a massa volúmica aparente e o módulo de elasticidade.	69

Índice de tabelas

Tabela 2.1 Propriedades exigidas a uma argamassa térmica, adaptado da norma EN 998-1 (CEN, 2010).	7
Tabela 2.2 Algumas características da perlite expandida (adaptado de Melo, 2000).	19
Tabela 2.3 Propriedades das argamassas térmicas industriais de agregados correntes.	25
Tabela 2.4 Propriedades das argamassas térmicas industriais compostas por agregados de aerogel.	27
Tabela 3.1 Quantidades utilizadas na produção das argamassas com agregados EPS.	32
Tabela 3.2 Quantidades utilizadas na produção das argamassas com agregados de perlite. ..	32
Tabela 3.3 Descrição dos provetes utilizados na primeira fase do trabalho experimental.	32
Tabela 3.4 Quantidades utilizadas na produção das argamassas de EPS na terceira fase.	34
Tabela 3.5 Quantidades utilizadas na produção das argamassas de perlite na terceira fase. ..	34
Tabela 3.6 Propriedades físicas da argamassa industrial AEPS (WSG, 2016).	35
Tabela 3.7 Propriedades físicas do aerogel de sílica utilizado (Enersens, 2013).	36
Tabela 3.8 Total de ensaios realizados durante a campanha experimental.	47
Tabela 4.1 Resultados da massa volúmica aparente em estado fresco, primeira fase.	51
Tabela 4.2 Resultados da massa volúmica aparente em estado fresco, terceira fase.	52
Tabela 4.3 Resultados da massa volúmica aparente no estado endurecido na 1ª fase.	53
Tabela 4.4 Resultados da massa volúmica aparente no estado endurecido na 2ª fase.	53
Tabela 4.5 Resultados da massa volúmica aparente no estado endurecido na 3ª fase.	53
Tabela 4.6 Resultados da massa volúmica aparente no estado endurecido seco na 1ª fase. ..	55
Tabela 4.7 Resultados da condutibilidade térmica no estado endurecido para a sonda de contacto.....	57
Tabela 4.8 Resultados da condutibilidade térmica no estado endurecido para a sonda de agulha.	57
Tabela 4.9 Validação dos resultados obtido pela sonda de contacto.....	58
Tabela 4.10 Resultados da condutibilidade térmica no estado endurecido seco para a sonda de contacto.....	59
Tabela 4.11 Resultados da condutibilidade térmica no estado endurecido seco para a sonda de agulha.	59
Tabela 4.12 Comparação dos resultados da condutibilidade térmica pelo método da sonda de agulha e pelo HFM.....	60
Tabela 4.13 Resultados dos ensaios da resistência à compressão.	62
Tabela 4.14 Valores do módulo de elasticidade dinâmico e de torção para as argamassas AEps.	64
Tabela 4.15 Valores do módulo de elasticidade dinâmico e de torção para as argamassas APerlite.....	64
Tabela 4.16 Resultados obtidos para as argamassas A119 e S119.....	70
Tabela A1.0.1 Resultados individuais da massa volúmica aparente em estado fresco (Fase 1).	A-2

Tabela A1.0.2 Resultados individuais da massa volúmica aparente em estado fresco (Fase 3).	A-2
Tabela A1.0.3 Resultados individuais da massa volúmica para AEPS, em estado endurecido (Fase 1).....	A-2
Tabela A1.0.4 Resultados individuais da massa volúmica para APerlite, em estado endurecido (Fase 1).....	A-3
Tabela A1.0.5 Resultados individuais da massa volúmica aparente em estado endurecido (Fase 2).....	A-3
Tabela A1.0.6 Resultados individuais da massa volúmica aparente em estado endurecido (Fase 3).....	A-3
Tabela A1.0.7 Resultados individuais da massa volúmica aparente para AEPS, em estado endurecido seco (Fase 1).	A-3
Tabela A1.0.8 Resultados individuais da massa volúmica aparente para APerlite, em estado endurecido seco (Fase 1).	A-4
Tabela A1.0.9 Resultados individuais da massa volúmica aparente em estado endurecido (Fase 3).....	A-4
Tabela A2.0.1 Resultados individuais da condutibilidade térmica para AEPS (Fase 1).	A-4
Tabela A2.0.2 Resultados individuais da condutibilidade térmica para APerlite (Fase 1).....	A-5
Tabela A2.0.3 Resultados individuais da condutibilidade térmica (Fase 2).	A-5
Tabela A2.0.4 Resultados individuais da condutibilidade térmica (Fase 3).	A-5
Tabela A2.0.5 Resultados individuais da condutibilidade térmica para AEPS, em estado seco (Fase 1).....	A-5
Tabela A2.0.6 Resultados individuais da condutibilidade térmica para APerlite, em estado seco (Fase 1).....	A-6
Tabela A2.0.7 Resultados individuais da condutibilidade térmica em estado seco (Fase 2).	A-6
Tabela A2.0.8 Resultados individuais da condutibilidade térmica em estado seco (Fase 3).	A-6
Tabela A3.0.1 Resultados individuais da resistência à compressão.	A-7
Tabela A4.0.1 Resultados individuais do módulo de elasticidade dinâmico e de torção para AEPS.	A-7
Tabela A4.0.1 Resultados individuais do módulo de elasticidade dinâmico e de torção para APerlite.....	A-7

Abreviaturas

APFAC - Associação Portuguesa Fabricantes Argamassas Construção;

ASTM - *American Society for Testing and Materials*;

CEN - *Comité Européen de Normalisation*;

EN - *European Standard*;

EPS - Poliestireno expandido;

ETICS – Sistemas Compósitos de Isolamento Térmico pelo Exterior;

ICB - Aglomerado de cortiça expandida;

IPQ - Instituto Português da Qualidade;

MW – Lã Mineral;

RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios;

REH - Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação;

XPS – Poliestireno expandido extrudido.

Simbologia

A^{EPS} - Argamassa industrial composta por EPS;

A^{Ind} - Argamassa industrial;

$A^{Perlite}$ - Argamassa industrial composta por perlite;

A^x - Argamassa industrial de base EPS e com x % de aerogel adicionado relativamente à massa da argamassa industrial em pó;

R^2 - Coeficiente de determinação;

S^x - Argamassa industrial de base perlite e com x % de aerogel adicionado relativamente à massa da argamassa industrial em pó;

f_c – Resistência à compressão [MPa];

E – Módulo de elasticidade dinâmico [MPa];

δ – Relação entre as argamassas industriais A^{EPS} e $A^{Perlite}$ para cada percentagem diferente de aerogel;

Δ – Variação em relação à amostra de referência;

λ - Condutibilidade térmica [W/m.K];

ρ - Massa volúmica aparente [kg/m³].

1 Introdução

1.1 Considerações iniciais

Com a crescente preocupação por parte da sociedade no que se refere à preservação do planeta, à inversão do aumento da poluição verificado nos últimos anos, ao consumo excessivo dos recursos materiais que se dispõe, mas também às exigências de maior conforto térmico, especialistas em diversas áreas têm desenvolvido produtos e metodologias mais sustentáveis. Na área da construção civil tem-se feito um esforço no sentido de uma melhoria da capacidade térmica e acústica de uma habitação. A constante mudança e atualização dos regulamentos relacionados com a sustentabilidade dos edifícios, como o RCCTE, são outro indicador de uma evolução neste campo.

Com vista à melhoria tanto a nível térmico como acústico dos sistemas de isolamento, têm vindo a ser desenvolvidos estudos relativamente a materiais isolantes inovadores, nomeadamente em argamassas de desempenho térmico melhorado. Com estas argamassas pretende-se que, para além de uma melhoria térmica, não se comprometa em demasia a resistência e durabilidade das mesmas. Designam-se deste modo, pois substitui-se os agregados pesados como a areia, por agregados mais leves, usualmente a cortiça expandida, o EPS, argila expandida e a perlite expandida.

Várias empresas, tanto a nível nacional, como a nível internacional, têm vindo a desenvolver e a melhorar o desempenho das argamassas térmicas, de modo a otimizá-las e a obter um melhor produto para corresponder à procura do mercado. A nível nacional existem argamassas industriais com condutibilidades térmicas cerca de 0,050 W/m.K constituídas por agregados leves de cortiça expandida e EPS. No entanto a nível internacional, em países com necessidades de isolamento térmico habitacional mais exigentes, tem-se estudado recentemente outros tipos de agregados leves (aerogel de sílica), que usados do mesmo modo, isto é, incorporados nas argamassas em substituição de agregados de massa volúmica superior, podem levar à obtenção de melhores resultados no que diz respeito ao isolamento térmico, beneficiando das boas propriedades do referido agregado.

Na sequência do conhecimento adquirido no âmbito do projeto Parede Eficiente Plus (PEP) - Projeto 2102, em parceria com a Weber Saint-Gobain, realizou-se uma campanha experimental, que consistiu em adicionar diferentes quantidades de aerogel de sílica a duas argamassas industriais previamente fabricadas, analisando a sua influência no desempenho das argamassas.

1.2 Objetivo e metodologia da dissertação

Esta dissertação tem como principal objetivo, utilizando vários materiais e agregados leves (maioritariamente o aerogel), a produção e o ensaio de argamassas térmicas industriais, que apresentem um comportamento favorável ao nível da condutibilidade térmica, sem comprometer significativamente a sua resistência mecânica.

Pretende-se ao longo desta dissertação:

- Estudar a influência da adição de agregados leves, particularmente do aerogel de sílica, na constituição de duas argamassas térmicas industriais de diferentes formulações, ao nível do desempenho térmico e da capacidade mecânica.
- Identificar formas de melhorar o desempenho térmico das argamassas térmicas em análise com o objetivo de atingir valores para a condutibilidade térmica inferiores a 0,042 W/m.K.

A metodologia utilizada com vista aos objetivos propostos passa por:

- Caracterizar o desempenho e analisar propriedades, como a massa volúmica aparente, a condutibilidade térmica, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade dinâmico e de torção das duas argamassas térmicas industriais, aquando da adição de aerogel na mistura.
- Analisar a relação entre as diferentes propriedades das argamassas térmicas, de modo a compreender em que aspeto, a introdução de agregados leves, melhora o seu desempenho e que propriedades são afetadas com esta adição.

1.3 Organização e estrutura da dissertação

A dissertação encontra-se estruturada em cinco capítulos principais.

Capítulo 1 – Elabora-se um breve enquadramento da problemática que suscitou o interesse do estudo de argamassas térmicas de desempenho melhorado para revestimentos exteriores. Apresenta-se ainda os objetivos que se pretendem alcançar com esta análise e o modo como a dissertação se encontra estruturada.

Capítulo 2 – O estado da arte refere-se a uma análise geral e explicação da temática e dos problemas relacionados com a mesma. Definem-se alguns termos e sistemas construtivos de maior relevância ao correto entendimento da restante dissertação. Por fim, enumera-se um conjunto de estudos e trabalhos experimentais desenvolvidos por diversos investigadores na área do isolamento em edifícios e das argamassas térmicas.

Capítulo 3 – Apresenta-se e explica-se detalhadamente todas as metodologias de ensaios experimentais necessárias para a obtenção dos resultados pretendidos. Define-se os materiais usados durante a produção das argamassas, o tipo de provetes utilizados consoante o ensaio pretendido, os ensaios realizados com base nas normas europeias e internacionais e o número de amostras produzidas ao longo de todo o trabalho experimental.

Capítulo 4 – Apresenta-se os resultados provenientes dos ensaios experimentais realizados às argamassas industriais e efetua-se comentários a cerca das tendências de cada propriedade e a melhoria ou agravamento relativa às mesmas. Analisa-se ainda a relação entre as diversas propriedades.

Capítulo 5 – Identificam-se as conclusões finais a retirar deste trabalho experimental, sintetizando os resultados de maior relevância, bem como algumas propostas para desenvolvimentos futuros.

No final da dissertação pode-se consultar as referências bibliográficas, bem como as normas e regulamentos utilizados. Os resultados individuais dos ensaios efetuados ao longo do trabalho experimental apresentados nos anexos.

2 Sistemas de isolamento térmico e argamassas térmicas

2.1 Considerações iniciais

O presente capítulo tem como principal objetivo a apresentação da problemática relacionada com os materiais isolantes e dos avanços realizados de modo a solucioná-las. Identifica-se alguns conceitos básicos importantes para uma adequada compreensão do tema e define-se as composições das argamassas térmicas, caracterizando os agregados leves (de EPS, perlite e aerogel de sílica), os processos construtivos e as suas vantagens e desvantagens. Por fim, termina-se com uma pesquisa de estudos efetuados por alguns autores, de modo a permitir uma análise comparativa das soluções existentes no mercado.

2.2 Enquadramento

Com o aumento da população mundial, a sua migração para áreas urbanas e o aumento das exigências das pessoas relativamente ao conforto térmico das suas habitações, os gastos energéticos têm vindo a aumentar proporcionalmente e começam a ser um problema. Segundo a Enerdata (2012), cerca de 41% da energia final total consumida em toda a Europa, em 2010, era utilizada no sector da construção, 32% nos transportes, 25% na indústria e 2% na agricultura. Grande parte destes gastos energéticos no sector habitacional está diretamente relacionada com a necessidade de manter uma temperatura constante no interior, independentemente da temperatura exterior (figura 2.1).

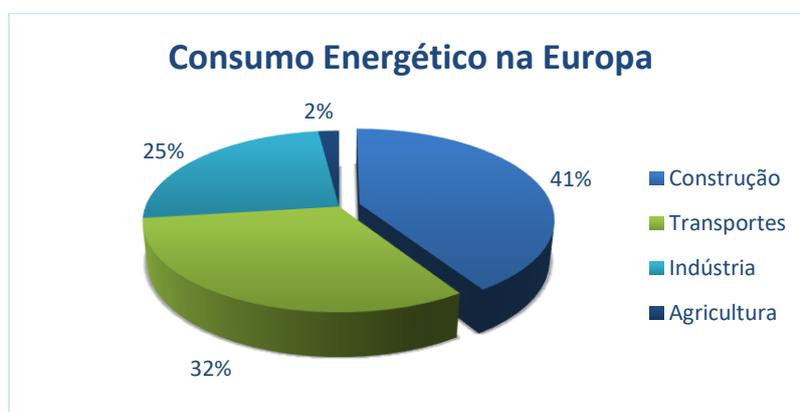


Figura 2.1 Consumo energético europeu nos diferentes sectores (Enerdata, 2012).

De modo a diminuir estes gastos em todos os imóveis, a legislação existente em Portugal, o RCCTE (Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios de 1990), foi revista em 2013, entrando em vigor o REH (Regulamento de Desempenho Energético dos Edifícios de Habitação). Ambos os regulamentos contemplam a obrigatoriedade de todos os imóveis terem um Certificado Energético (Decreto-Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto), quando na publicitação de qualquer anúncio comercial ou celebração de contratos, cuja

classificação poderá ir de A+ a F, consoante o seu desempenho energético, sendo que A+ é a melhor classificação possível e F a pior.

Um dos grandes problemas de hoje em dia no sector da construção são as perdas energéticas e como tornar um edifício mais eficiente energeticamente. Este problema não se colocava antigamente, pois as atenções estavam voltadas para outro tipo de problemáticas, como a eficácia da estrutura e dos processos construtivos. No entanto, hoje com a preocupação de se diminuir o impacto ambiental e habitar construções mais *Ecofriendly*, surgiu a necessidade do desenvolvimento de novos materiais que concedessem um melhor desempenho térmico às paredes dos edifícios, isto é, cujas propriedades incluíssem uma baixa condutibilidade térmica e ao mesmo tempo não tivessem influência nos restantes elementos construtivos dos edifícios.

As paredes exteriores têm como funções fundamentais a separação e delimitação dos espaços de uma edificação; assegurar a estanqueidade ao ar e à água; salvaguardar a segurança contra incêndio; e garantir um adequado isolamento térmico e acústico. Diferentes sistemas construtivos têm sido desenvolvidos ao longo dos anos, como sistemas de paredes com blocos térmicos. Apesar de estes melhorarem o isolamento de um edifício, uma parede apresenta geralmente elementos de revestimento que poderão contribuir, até mais ativamente, para a melhoria do desempenho térmico global da parede.

Os revestimentos de paredes exteriores constituem a primeira camada de proteção relativamente a agentes erosivos e exteriores (estanqueidade à água, vento, animais e pessoas) e têm como funções, além da proteção referida, proporcionar um aspeto visual agradável e conferir ao elemento a planeza e regularidade exigida. No caso de revestimentos exteriores isolantes, estes ainda se destinam a um bom isolamento térmico e acústico (Veiga, 2001).

De modo a melhorar o isolamento térmico exterior de uma parede recorre-se frequentemente ao ETICS (*External Thermal Insulating Composite System*). O ETICS é um sistema compósito isolante composto por várias camadas, colocado como revestimento exterior do edifício, e que confere um melhor comportamento térmico às paredes. Com materiais isolantes, como placas de EPS (poliestireno expandido moldado), XPS (poliestireno expandido extrudido), MW (lã mineral), ICB (aglomerado de cortiça expandida) pode-se chegar a valores de condutibilidade térmica na ordem dos 0,035-0,037 W/m.K (Veiga *et al.*, 2012). Apesar de ser considerada uma solução bastante razoável, este sistema tem algumas desvantagens inerentes, como o facto de ser uma solução de elevado custo de investimento (ainda que seja compensado após algum tempo), ter uma resistência mecânica reduzida (apesar de poder ser reforçado com uma malha de fibra de vidro ou metálica), uma baixa durabilidade (presença frequente de anomalias associadas a fenómenos higrótérmicos e de resistência ao impacto) e, sobretudo, ser de difícil aplicação em zonas irregulares ou de remate que o condiciona, por exemplo, em utilizações em contexto de reabilitação de edifícios antigos (Corrêa, 2016).

As argamassas térmicas são também uma solução de revestimento que pretende melhorar o desempenho térmico da parede e surgem como uma alternativa, em certos casos, às soluções de ETICS, sobretudo com maior potencial de aplicação ao nível da reabilitação de paredes antigas. São consideradas argamassas térmicas todas as que apresentem agregados leves na sua constituição, em detrimento dos agregados de maior massa volúmica aparente, nomeadamente agregados de areia e que se caracterizem por apresentar uma condutibilidade térmica de classe T1 ou T2 ($T1 - \lambda \leq 0,1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$; $T2 - \lambda \leq 0,2 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), de acordo com a Norma EN 998-1 (CEN, 2010). Uma argamassa térmica para o revestimento de paredes deve ainda respeitar o regulamento existente referente ao desempenho térmico de edifícios (RCCTE, 2006). Além das características referidas anteriormente, estas argamassas devem apresentar as propriedades indicadas na tabela 2.1, as quais são a base para uma comprovação de qualidade com Marcação CE.

Tabela 2.1 Propriedades exigidas a uma argamassa térmica, adaptado da norma EN 998-1 (CEN, 2010).

Características	Classes	Exigência
Massa volúmica	-	Declarar valor
Resistência à compressão	CS I a CS IV	CS I (0,4 to 2,5 N/mm ²) a CS IV ($\geq 6 \text{ N/mm}^2$)
Aderência ao suporte	-	Declarar valor e padrão de rotura
Absorção de água por capilaridade	W0, W1 e W2	W1 ($c \leq 0,40 \text{ kg/m}^2\text{min}^{0.5}$)
Condutibilidade térmica	T1 e T2	$\lambda \leq 0,10 \text{ W/m.K}$ (T1) ou $\lambda \leq 0,20 \text{ W/m.K}$ (T2)
Reação ao fogo	A a F	Se material orgânico $\leq 1\%$ - A1, senão é necessário fazer ensaio
Durabilidade	-	Declarar durabilidade
Permeabilidade ao vapor	-	$\mu \leq 15$

Apesar de as argamassas térmicas correntes apresentarem valores de coeficiente de condutibilidade térmica superiores (λ mínimo de cerca de $0,05 \text{ W/m.K}$), têm potencial de aplicação relativamente aos ETICS, em situações específicas, tais como: na reabilitação de edifícios mais antigos; no reforço de desempenho térmico de paredes existentes já com algum isolante térmico; na garantia do aspeto da fachada existente numa reabilitação térmica; ou na reabilitação térmica de fachadas com arquitetura mais complexa ou com superfícies curvas. A sua valência em contexto de paredes antigas é também especialmente relevante por apresentarem coeficientes de permeabilidade ao vapor de água muito baixos, perfeitamente adequados às exigências funcionais das mesmas.

No seguimento das argamassas térmicas, diversos agregados isolantes têm sido incorporados em argamassas e estudados, de modo a obterem-se materiais de melhor desempenho térmico. A nanotecnologia, atualmente, tem suscitado alguma atenção, na medida

em que apresenta um grande potencial em aplicações práticas, nomeadamente na melhoria das propriedades térmicas de argamassas de elevado desempenho. Os nanomateriais distinguem-se dos demais por serem compostos por nanopartículas (1 a 100 nm), isto é, possuem estruturas químicas de muito reduzida dimensão (Raki *et al.*, 2010). Dos nanomateriais existentes (nanopartículas dióxido de titânio, aerogel de sílica, nanopartículas de sílica, nanotubos de carbono, entre outros), o que tem ganho maior destaque é o aerogel de sílica. O aerogel de sílica apresenta características como uma massa volúmica aparente e a condutibilidade térmica muito baixas (115 a 125 kg/m³, em alguns casos inferior, e 0,014 a 0,016 W/m.K respetivamente), que fazem deste material um potencial isolante para incorporação em argamassas térmicas para revestimento de edifícios (Júlio *et al.*, 2016).

2.3 Sistemas de desempenho térmico melhorado

2.3.1 Revestimentos de desempenho térmico melhorado

Ao longo dos anos têm-se desenvolvido sistemas de isolamento térmico pelo exterior, de modo melhorar o conforto térmico dos edifícios. Estes sistemas, além de melhorarem o conforto habitacional, pretendem também reduzir problemas como as pontes térmicas (consequentemente, o fenómeno da termoforese) e a elevada espessura e massa das paredes num sistema convencional de parede dupla.

Garrido (2015) ao estudar diversas argamassas térmicas com distintas propriedades, concluiu que a necessidade de aquecimento e arrefecimento de um edifício é inferior em cerca de 13% para soluções de isolamento exterior e distribuído (em ambas as superfícies), quando comparando com isolamento pelo interior, devido à presença de pontes térmicas.

Os sistemas de isolamento térmico exteriores, de acordo com Veiga *et al.* (2012), podem ser classificados em diversos tipos.

- Revestimentos compósitos de isolamento térmico exterior (ETICS);
- Revestimentos constituídos por painéis isolantes fixados diretamente ao suporte (*Vêntures*);
- Revestimentos de fachada ventilada com isolante na caixa de ar;
- Revestimentos aderentes constituídos por argamassas.

Dos sistemas referidos, o que tem sido utilizado mais correntemente na construção e sofrido um crescimento acentuado são os ETICS, uma vez que apresentam várias vantagens (Freitas *et al.*, 2005).

- Redução das pontes térmicas, como se pode observar na figura 2.2;
- Maior economia energética;

- A dispensa de paredes duplas, possibilitando a redução da espessura das paredes e consequentemente aumentando a área habitável e reduzindo as cargas permanentes sobre a estrutura;
- Uma melhor impermeabilização do sistema, sendo que este sistema é considerado estanque à água;
- Redução das condensações à superfície e no interior das paredes;
- A capacidade de acompanhamento dos movimentos do edifício, presentes devido a variações térmicas existentes;
- A possibilidade de aplicação do sistema sem perturbação dos ocupantes dos edifícios, uma vez que as intervenções são realizadas pelo exterior.

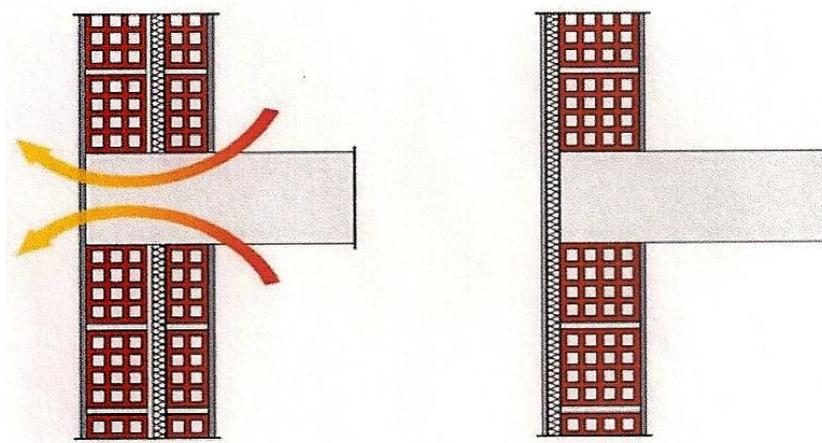


Figura 2.2 Eliminação das pontes térmicas com a instalação de isolamento térmico pelo exterior na figura da direita (Freitas *et al.*, 2005).

Apesar de todas as vantagens enumeradas, existem igualmente desvantagens. A difícil aplicação aquando da existência de aberturas ou pormenores complexos, a necessidade de mão-de-obra especializada, a baixa resistência mecânica e a reação ao fogo dos seus constituintes, como o EPS, são alguns dos pontos negativos deste sistema construtivo (Veiga *et al.*, 2012); (Corrêa, 2016). A baixa resistência ao choque e a deficiente aplicação da camada de proteção, são algumas causas que levam ao aparecimento de anomalias na superfície do sistema, nomeadamente cavidades, e consequentemente à degradação da funcionalidade térmica do isolamento, à criação de pontes térmicas e à possibilidade de entrada de água no sistema (Amaro *et al.*, 2013).

O sistema ETICS pode apresentar pequenas variações dependendo do fabricante, ainda assim, de um modo geral a disposição das camadas é muito semelhante. Segundo um dos fabricantes do sistema ETICS [W1], este pode ser constituído por um pano de alvenaria simples ou bloco térmico, seguido de uma camada isolante, que usualmente consiste em placas de EPS coladas (por uma argamassa de colagem) e/ou fixadas mecanicamente ao suporte. Uma camada de proteção do isolante térmico composta por uma camada de base com uma boa resistência

mecânica que incorpora uma rede de reforço. Para finalizar, um primário de regularização e uma camada de acabamento que confere à parede a estética exigida. O sistema referido e a sua constituição pode-se observar na figura 2.3.

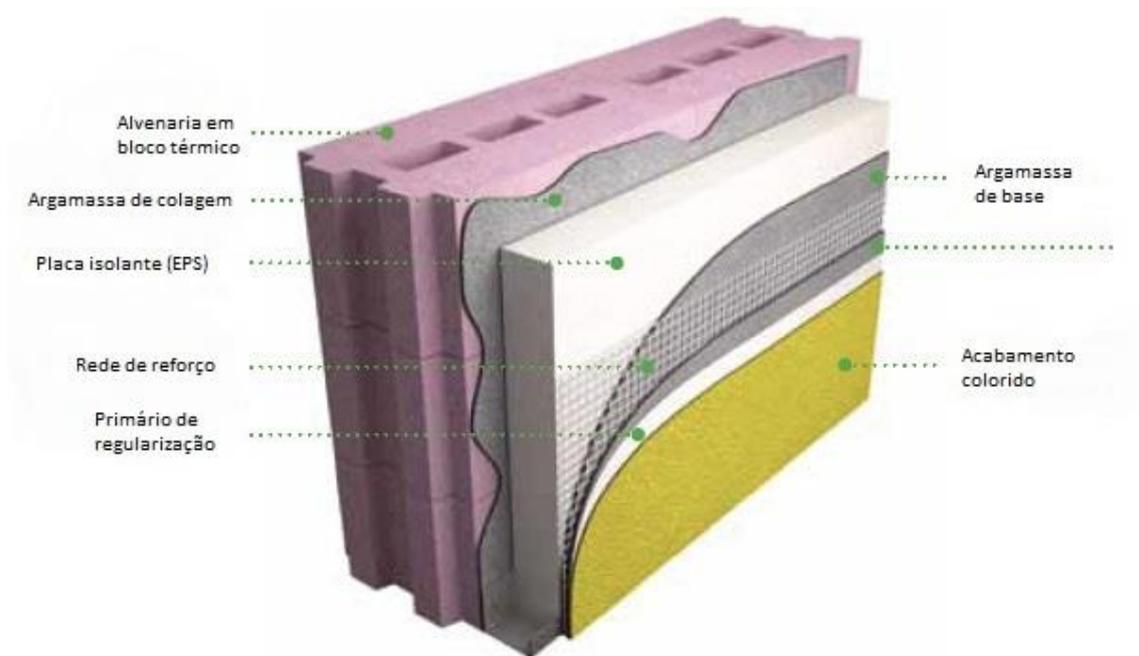


Figura 2.3 Composição por camadas do sistema de ETICS [W1].

Para uma correta aplicação do sistema ETICS, é necessária uma seleção prudente, por um lado dos materiais isolantes a aplicar em cada situação, e por outro dos materiais atribuídos à preparação dos suportes, colagem e acabamentos que determinam a parte estética da fachada. Além da escolha dos materiais, a precisa elaboração de um projeto que tenha em consideração todos os pormenores construtivos e a correta aplicação com mão-de-obra de formação técnica necessária, são fatores de elevada relevância, de modo a tirar total partido do sistema e a garantir a durabilidade esperada (APFAC, 2015).

As operações efetuadas para aplicação deste sistema, passam em primeiro lugar pela limpeza e regularização da superfície do suporte, em que o tratamento que é dado à superfície depende em grande parte do suporte existente. Após a verificação de uma boa superfície de suporte, fixa-se mecanicamente os perfis de arranque inferior e aplica-se o material de isolamento tanto por colagem, como por fixação mecânica. A colagem das placas isolantes é efetuada com a aplicação de uma argamassa de ligante misto comum geralmente pré-doseada, enquanto que a fixação mecânica é composta por buchas em plástico de cabeça circular. Depois da fixação das placas de isolante procede-se à colagem dos perfis de canto e nos pontos singulares, com a função de reforçar e assegurar a continuidade do sistema (figura 2.4) (Freitas *et al.*, 2005); (APFAC, 2015).

Como proteção do isolamento aplicam-se duas camadas de base em argamassa, entre as quais se introduz uma armadura de fibra de vidro. Este processo deve ser executado com o auxílio de uma talocha metálica.

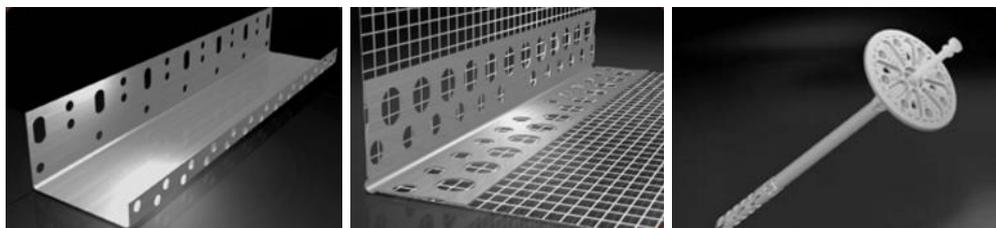


Figura 2.4 Perfis e acessórios metálicos/plásticos utilizados na aplicação do sistema ETICS. Perfil de arranque, perfil de canto e bucha de fixação mecânica [W2].

Para finalizar, se necessário, aplica-se o primário sobre a camada de base e de seguida o revestimento final de acabamento, camada que atribui o aspeto final ao sistema e concede alguma proteção aos agentes climáticos (Freitas *et al.*, 2005); (APFAC, 2015).

Apesar das inúmeras vantagens apresentadas por este sistema, de modo a solucionar os pontos negativos referidos ou mesmo melhorar aspetos positivos, como a difícil aplicação (devido aos suportes/acessórios para as placas de isolante) e a necessidade de mão de obra especializada, outras soluções foram desenvolvidas, particularmente os revestimentos aderentes constituídos por argamassas com agregados isolantes térmicos.

2.3.2 Argamassas de desempenho térmico melhorado

Uma argamassa pode-se definir como uma combinação de agregados, um ou mais ligantes de origens distintas e adições, que variam dependendo do suporte, do modo de aplicação e do tipo de desempenho que se pretende alcançar [W3].

Com base na Norma EN 998-1 (CEN, 2010), as argamassas de revestimento podem ser classificadas, no que se refere ao local de produção, segundo em três grupos essenciais: argamassas tradicionais, argamassas industriais semi-acabadas e argamassas industriais. As argamassas tradicionais ou doseadas em obra caracterizam-se por serem compostas por constituintes, como ligantes, agregados, água e adições, doseados e misturados em obra. Nas argamassas industriais semi-acabadas os seus constituintes são pré-doseados em fábrica e misturados em obra e as argamassas industriais identificam-se por serem tanto doseadas como misturadas em fábrica, apresentando-se “em pó” (requerendo apenas a adição de água) ou “em pasta” pronta a aplicar.

Com o desenvolvimento da tecnologia na construção, dos métodos construtivos e de materiais inovadores, o nível de exigência tem subido relativamente às propriedades mecânicas,

acústicas e térmicas das argamassas de revestimento e cada vez mais são publicados estudos nesse sentido. Neste contexto, surgem as argamassas térmicas industriais de revestimento.

Uma argamassa térmica caracteriza-se por possuir agregados isolantes em substituição dos agregados correntes de areia, diminuindo propriedades como a massa volúmica aparente e a condutibilidade térmica. No que respeita à fabricação, normalmente estas argamassas são preparadas industrialmente, combinando e misturando todos os seus componentes a seco em fábrica, e posteriormente transportadas para o local. Em obra estas são aplicadas adicionando água à mistura, formando uma pasta viscosa que pode ser projetada diretamente na fachada.

Esta solução construtiva apresenta bastantes pontos positivos e mais-valias na área da construção. Além das vantagens apresentadas anteriormente referentes a sistemas de isolamento exterior, como os ETICS, as argamassas de desempenho térmico melhorado destacam-se ainda por serem de bom comportamento face ao fogo (menos expressivo no caso de ter muito EPS na sua constituição), aplicáveis tanto em edifícios novos como em existentes (reabilitação), usadas em superfícies não-alinhadas e curvas (independente da arquitetura ou solução estrutural executada) e de fácil execução em reabilitação de fachadas, requerendo técnicas de aplicação relativamente comuns na área da construção (Barbero *et al.*, 2014); (Frade *et al.*, 2014). Com a utilização de argamassas térmicas, características como uma superfície plana, uma colagem de qualidade e a necessidade de um sistema de suporte mecânico (perfis metálicos), usualmente necessárias na aplicação de ETICS, deixam de ser uma preocupação, dado que estas aderem diretamente ao suporte através de uma projeção mecânica (Ibrahim *et al.*, 2015).

Por outro lado, como desvantagens, destacam-se uma condutibilidade térmica ligeiramente superior em certas argamassas térmicas (valores mínimos correntes de aproximadamente 0,05 W/m.K) comparativamente aos materiais isolantes utilizados nos ETICS (Corrêa, 2016). Nas argamassas térmicas de condutibilidades mais baixas (cerca de 0,025 W/m.K), com incorporações de outros agregados isolantes inovadores, o fator determinante é o elevado custo e as resistências mecânicas menores que levantam questões sobre a sua durabilidade (Garrido, 2015).

Relativamente ao método construtivo utilizado na aplicação de argamassa térmicas, começa-se pela limpeza da superfície de aplicação, com o objetivo de assegurar uma boa aderência da argamassa térmica ao suporte. Para isso, é necessário garantir uma superfície isenta de zonas de destacamento e impecavelmente limpa e livre de qualquer sujidade (pó, gordura, óleo descofrante).

De seguida, projeta-se mecanicamente a argamassa isolante, de modo a cobrir toda a superfície de aplicação, originando uma camada de cerca de 2-10 cm de isolante, dependendo do produto (figura 2.5 a). Note-se que, no caso de a camada de isolante ser superior a 4 cm,

para se obter o desempenho físico e mecânico pretendido, a argamassa deve ser aplicada em várias camadas sucessivas (cerca de 4 cm por camada). Após a projeção de todo o material isolante, efetua-se o nivelamento da argamassa com o auxílio de uma régua e de uma talocha (figura 2.5 b). Importa garantir ainda um arranque do sistema de isolamento abaixo do solo e a respetiva impermeabilização até 40 cm acima do nível do solo (Duarte, 2017).

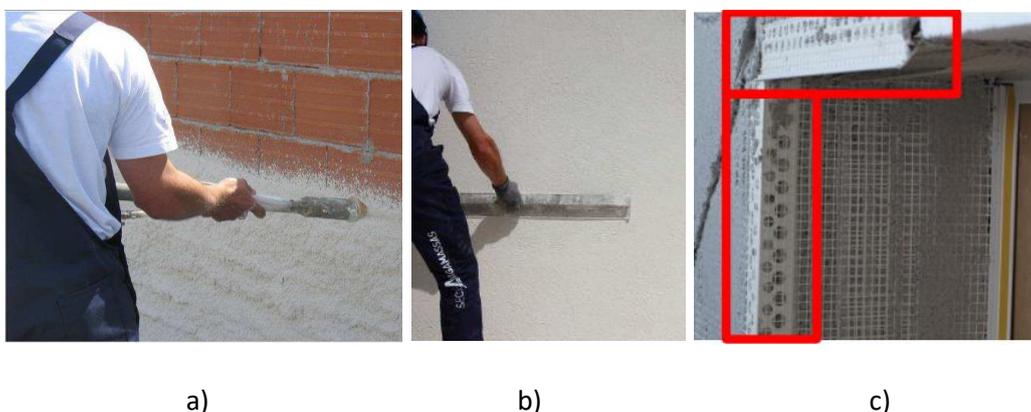


Figura 2.5 (a) Aplicação da argamassa térmica por projeção em suporte de alvenaria; (b) Nivelamento da argamassa isolante com a régua (Gonçalves *et al.*, 2012); (c) Pormenor da camada de reforço e do reforço das singularidades (Duarte, 2017).

Com a argamassa térmica aplicada e endurecida, procede-se à execução da camada de base, que confere uma proteção mecânica ao isolante. Esta camada de base consiste na aplicação de uma primeira camada de base (argamassa corrente com 2 a 5 mm de espessura), na qual se impregna uma armadura de fibra de vidro e reforços para singularidades quando ainda fresca (figura 2.5 c). Posteriormente à secagem da primeira de mão, aplica-se uma segunda camada, com a mesma espessura da primeira, cobrindo toda a armadura de reforço. Todo este processo deve ser executado com o auxílio de uma talocha metálica. Note-se ainda que para garantir a distribuição dos esforços por toda a superfície, sempre que houver uma descontinuidade da malha de fibra de vidro, deve-se sobrepor a mesma pelo menos 10 cm.

Para terminar, coloca-se o primário (pintura opaca à base de resinas em solução aquosa) sobre a camada de base, com o propósito de regular a absorção do suporte, controlar o efeito da alcalinidade da argamassa de suporte e melhorar a aderência da camada final do sistema. Com o primário aplicado, executa-se camada de acabamento, que confere ao sistema, a aparência visual e o protege de agentes climatéricos adversos (Gonçalves *et al.*, 2012); (APFAC, 2015); [W4].

O esquema representativo do sistema utilizado na aplicação de argamassas térmicas pode-se observar na figura 2.6.

De um modo geral, a substituição de agregados de areia por agregados mais leves, resulta numa produção de argamassas térmicas com uma diminuição de cerca de 50% a 60% da massa volúmica aparente, uma melhoria de 80% a 90% relativamente ao comportamento

térmico, uma melhoria do desempenho acústico e ainda razoáveis comportamentos mecânicos e higrotérmicos (Frade *et al.*, 2014). O trabalho experimental de Soares *et al.* (2014) conclui que a introdução de pequenas percentagens de agregados leves numa argamassa originam também um aumento da porosidade aberta, da absorção de água por capilaridade e da facilidade de secagem.

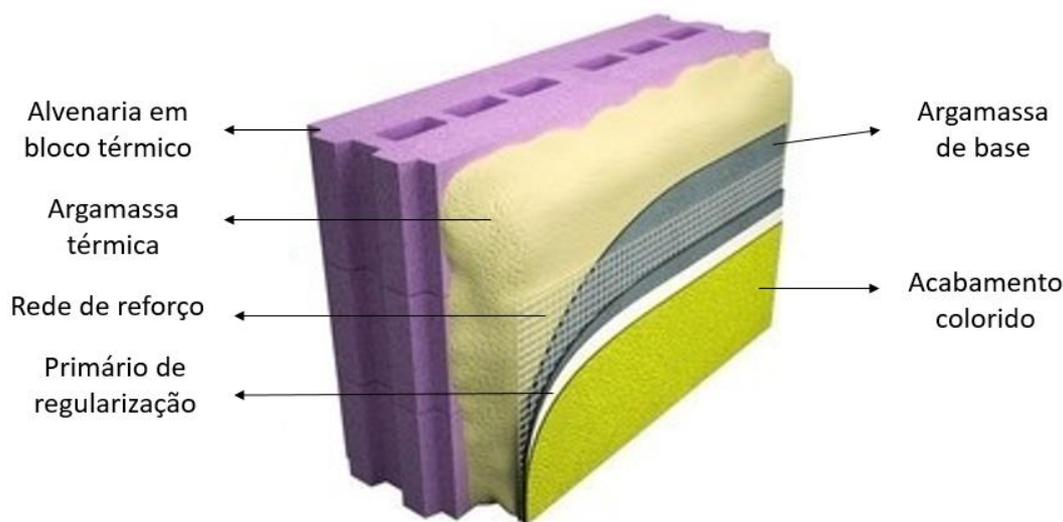


Figura 2.6 Esquema por camadas dum sistema com argamassas térmicas [W4];

A introdução de agregados leves com o objetivo da produção de argamassas térmicas, tem uma influência direta nas suas propriedades. De acordo com Veiga (2001), este tipo de agregados, além de melhorar o desempenho térmico das argamassas, é responsável pela diminuição do módulo de elasticidade, da massa volúmica aparente e da resistência mecânica. Apesar disso, este aspeto não se traduz obrigatoriamente numa fragilidade à fendilhação, principalmente devido à diminuição do módulo de elasticidade e ao incremento da ductilidade da argamassa. Como principal inconveniente apresentam uma baixa resistência ao choque e à perfuração do revestimento. Finalmente, a própria resistência à penetração de água sob pressão ou por capilaridade pode constituir uma desvantagem. Por esses motivos, diferentes sistemas de revestimento que incorporem agregados leves têm sido testados, e combinados com argamassas de acabamento, de forma a aumentar a resistência global (mecânica e higrotérmica) do sistema de revestimento.

2.4 Materiais constituintes de argamassas térmicas

Na procura de argamassas com propriedades térmicas melhoradas tem-se estudado, testado e analisado vários tipos de agregados leves, que se adicionam à cal, cimento e outros componentes, em detrimento da areia, de modo a encontrar as percentagens mais indicadas para de cada constituinte (Soares *et al.*, 2012); (Brás *et al.*, 2013).

2.4.1 Ligantes

Um ligante é o material ativo, cuja principal função passa pela formação de uma pasta que promova a aglutinação entre os grãos dos agregados. Nas argamassas atualmente utilizadas os ligantes mais correntes são os cimentos e as cais. Estas últimas apresentam uma subdivisão consoante o tipo de reação efetuada, podendo classificar-se como cais aéreas e cais hidráulicas. Apesar dos referidos serem os ligantes mais utilizados existe ainda o gesso, que pode ser utilizado juntamente com outro ligante, nomeadamente em acabamento de interiores e ainda a argila, a qual caiu em desuso em obras de construção civil (Faria, 2012).

2.4.1.1 Cimento

O cimento é um ligante hidráulico resultante da cozedura de calcários naturais e artificiais, que quando em contacto com a água, produz uma reação exotérmica, proporcionando após a cura, a resistência mecânica da respetiva argamassa. O cimento mais corrente é o *Portland*, o qual é produzido submetendo rochas de marga calcária e argilosas a temperaturas na elevadas, obtendo-se assim um pó de propriedades bastante peculiares. O principal componente na produção do cimento *Portland* são os silicatos de cálcio, originários de CaO e SiO_2 , em que o primeiro se obtém do carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e o segundo de minerais como as areias, argilas e xistos. A produção deste material caracteriza-se por ser relativamente simples, contudo requer um controlo minucioso das temperaturas e quantidades das matérias primas. Encontra-se dividida em diversas fases, em que se começa por misturar e fragmentar matérias primas como o calcário ou giz e a argila ou xisto, atingindo partículas inferiores a 90 μm . De seguida procede-se à fase fundamental do processo, em que se aquece a mistura referida a 1400-1500°C, resultando um produto em pó chamado clínquer. Esta fase pode ser dividida em duas, em que a primeira consiste num pré-aquecimento (900°C) e numa pré-calcinação ($CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2$) e a segunda na queima do material num forno rotativo levado até 1500°C. Por fim, a mistura é arrefecida até atingir os 60°C e misturada com pequenas quantidades de gesso e cal. Como resultado de todo este processo obtém-se 4 componentes, que por simplificação se designam por, silicato tricálcico (C_3S), silicato dicálcico (C_2S), aluminato tricálcico (C_3A) e ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), em que o C_3S confere uma maior resistência inicial e o C_2S demora um pouco mais a atingir a sua resistência máxima. C_3A e C_4AF não revelam um grande papel no que diz respeito à resistência. Em Portugal o cimento com maior utilização na produção de argamassas é o cimento *Portland* composto, no entanto utiliza-se também o *Portland* normal, o *Portland* branco e ainda cimentos pozolânicos (onde se substitui parte do clínquer por pozolanas), em situações que as argamassas requerem diferentes propriedades (Domone *et al.*, 2010); (Faria, 2012).

2.4.1.2 Cal

As cals podem ser aéreas ou hidráulicas, em que esta designação se refere ao tipo de reação da própria cal, isto é, enquanto a primeira faz presa pela ação do ar, mais concretamente fixando o dióxido de carbono presente no ar, a cal hidráulica faz presa maioritariamente através da reação com água e é graças ao contacto com esta que endurece.

As cals aéreas podem ainda classificar-se, quanto à sua composição, como cálcicas (CL) ou dolomíticas (DL), enquanto que as cals com propriedades hidráulicas se classificam como cals hidráulicas (HL), cals formuladas (FL) e cals hidráulicas naturais (NHL). Estas últimas são produzidas pela cozedura de rocha calcária mais ou menos argilosa ou siliciosa a uma temperatura de 1200°C, extintas e reduzidas a pó, com ou sem moagem, sem quaisquer outras adições, segundo a norma NP EN 459-1 (IPQ, 2011). Relativamente às cals hidráulicas e às cals formuladas, ambas podem conter algumas adições (gesso, *filleres* ou clínquer do cimento *Portland*) e são produzidas a temperaturas superiores (Faria, 2012). Segundo Faria *et al.* (2012), Portugal por possuir a matéria-prima necessária, é um dos países que produz cals hidráulicas naturais (NHL), mais concretamente as NHL3.5 e NHL5.

2.4.2 Agregados leves e isolantes

Os agregados numa argamassa corrente, normalmente constituídos por areia, têm como aspeto mais relevante a curva granulométrica, a qual indica a distribuição e quantidade de partículas presentes num determinado agregado. Com a combinação de vários agregados é possível obter uma curva otimizada e contínua, melhorando a distribuição dos grãos e do preenchimento dos vazios e como consequência diminuindo a quantidade de cimento necessário, o que leva por sua vez a uma redução dos problemas relacionados com a retração e fissuração. As areias mais utilizadas em Portugal são de origem siliciosa, calcária ou argilosa, e são usualmente extraídas do leito dos rios, de areeiros ou resultantes da fragmentação de rochas (Veiga, 2001).

Numa argamassa de revestimento corrente o agregado é maioritariamente composto por areias, contudo este material é de elevada massa volúmica (cerca de 1300 a 1700 kg/m³), o que confere uma condutibilidade térmica superior à desejada. Com isto, para a obtenção de argamassas de maior capacidade de isolamento térmico, têm surgido estudos, em que se substitui o agregado referido por agregados leves. Os agregados leves mais frequentemente utilizados são o poliestireno expandido (EPS) e a cortiça expandida. Existem ainda estudos recentes com argila expandida, perlite expandida, grânulos de vidro expandido, materiais de mudança de fase (PCM) e nanomateriais, como o aerogel de sílica (Gonçalves *et al.*, 2012); (Frade *et al.*, 2012); (Soares *et al.*, 2012). Os agregados referidos, além de se apresentarem como agregados leves, podem ainda considerar-se isolantes térmicos, no caso de possuírem uma condutibilidade térmica inferior a 0,065 W/m.K (RCCTE, 2006).

No âmbito deste trabalho, os agregados leves isolantes relevantes são os grânulos de poliestireno expandido moldado (EPS), a perlite expandida e o aerogel de sílica.

2.4.2.1 EPS (Poliestireno Expandido)

O EPS (figura 2.7) é um polímero celular e rígido, que se pode apresentar em diversas formas e aplicações, em que a principal utilização na área da construção civil são os vários tipos de isolamento. São exemplos de aplicações do EPS: o isolamento de telhados; de paredes pelo interior, quando combinado com placas de gesso laminado; de paredes pelo exterior em painéis de isolamento térmico (ETICS); e mais recentemente em argamassas térmicas, como agregado (EUMEPS, 2009).

É uma espuma de poliestireno moldada, constituída por um polímero de estireno que contém um agente expensor que é obtido a partir do petróleo através de várias transformações químicas. Com a matéria-prima transformada quimicamente, segue-se o processo de transformação física, onde se destacam três etapas distintas, a pré-expansão, o armazenamento intermédio e a moldagem (EUMEPS, 2014).

A primeira etapa passa por expandir o poliestireno através do aquecimento por contacto com o vapor de água (80 a 100°C) e com a ação de um agente expensor comumente utilizado (o pentano). O volume do material expande-se para cerca de 50 vezes do seu volume original e a massa volúmica aparente diminui dos 630 kg/m³ para os 10-30 kg/m³. Obtém-se um granulado de partículas composto por pequenas células fechadas com ar no seu interior. Segue-se a segunda fase, que consiste no armazenamento das partículas para estabilização. Nesta fase o granulado arrefece, criando uma depressão no seu interior e o interior das células é preenchido pelo ar circundante. Por fim, na fase da moldagem (não obrigatória se o produto final for o granulado), após a introdução do granulado em moldes expõe-se novamente o material a vapor de água, de modo a que todas as partículas se agreguem entre si. Os moldes apresentam o formato desejado pelo fabricante dependendo do produto final pretendido (EUMEPS, 2014); [W5]; [W18].

Este material apresenta propriedades bastante interessantes, nomeadamente uma baixa densidade que permite uma diminuição do peso próprio do edifício (na ordem dos 10-30 kg/m³), uma resistência mecânica elevada tendo em conta a sua massa volúmica, baixa absorção de água e humidade, compatibilidade com a maioria dos materiais utilizados na construção e ainda como principal característica o facto de ter uma muita baixa condutibilidade térmica de cerca de 0,035 W/m.K, decorrente de uma estrutura celular fechada que dificulta a transferência de calor. Do lado das desvantagens é um material muito inflamável, o que limita pontualmente a sua utilização, contudo atualmente já se pode encontrar EPS não inflamável disponíveis no mercado (Frade *et al.*, 2010); [W5].



Figura 2.7 Granulado de poliestireno expandido (EPS) [W6].

2.4.2.2 Perlite expandida

A perlite é um mineral de origem vulcânica e de composição siliciosa, com cerca de 70% de dióxido de silício na sua constituição e pode apresentar diferentes granulometrias (figura 2.8). Para a obtenção do produto final, perlite expandida, o mineral é extraído e fraturado com uma dimensão apropriada e levado a cerca de 900°C num forno rotativo, podendo este ser horizontal ou vertical. Nestas condições térmicas, como consequência da libertação de vapor de água, o material expande. A perlite é um material relativamente comum e pode ser encontrada um pouco por todo mundo, nomeadamente em países como os Estados Unidos, Itália e Japão (Melo, 2000).



Figura 2.8 Perlite expandida em diferentes tipos de granulometria, adaptado de [W7].

No que se refere às propriedades deste agregado isolante, pode-se afirmar que com a adição de perlite expandida numa argamassa, esta confere-lhe uma melhor resistência ao fogo e uma maior capacidade isolante, como consequência de uma redução da massa volúmica em 60%, quando comparada com uma argamassa usual de agregado pesado (areia). Como se pode observar na tabela 2.2, dependendo da classe granulométrica, este material apresenta uma massa volúmica aparente entre 40-85 kg/m³, uma condutibilidade térmica de 0,04 kcal/m.h.°C (corresponde a 0,04652 W/m.K), uma absorção de água em volume após 24 h de imersão de 170% em massa e um ponto de fusão a rondar os 1100°C (Melo, 2000); [W8].

Tabela 2.2 Algumas características da perlite expandida (adaptado de Melo, 2000).

Condutibilidade térmica (material seco à temperatura de 20°C):	0,04 kcal/m.h.°C
Massas volúmicas aparentes correntes: Classe granulométrica (mm): 0-0,9 0-1,2 0-3,2	40 a 50 kg/m ³ 50 a 60 kg/m ³ 75 a 85 kg/m ³
Absorção de água em volume após 24 horas de imersão:	170% em massa
Ponto de fusão:	1100°C

2.5 Aerogel de sílica como material isolante

Além dos materiais referidos, tem-se estudado nanomateriais (materiais inovadores na área da construção), entre eles o aerogel de sílica, pois apresenta propriedades térmicas bastante boas. No entanto, um dos maiores desafios da industrialização deste material, passa por reduzir substancialmente o seu custo de produção, principalmente no sector da construção, onde seria usado em quantidades enormes. Este custo quando comparado com sistemas de isolamento convencionais é bastante elevado o que impede uma entrada rápida no mercado (Ibrahim *et al.*, 2015).

2.5.1 Aerogel de sílica como agregado

O aerogel resultou de um desafio entre Steven Kistler (1931) e um amigo, para tentar substituir o líquido de gelatinas por um gás, sem causar qualquer encolhimento, ou seja, tentando manter o seu volume. O termo Aerogel não é referente a uma substância, mas à geometria da sua estrutura molecular que pode ser constituída por Dióxido Silício (SiO₂), Óxido de Alumínio (AlO₃), entre outros. No entanto usualmente chama-se aerogel quando se pretende referir ao aerogel de sílica [W9].

O aerogel (figura 2.9) é um material sólido, poroso, extremamente leve, derivado de um gel e, como referido, cuja parte líquida foi substituída por um gás. O resultado desse processo é um bloco transparente, rígido e frágil, que é capaz de resistir à compressão milhares de vezes o seu peso. Apresenta uma massa volúmica aparente extremamente baixa, valores entre 3-100 kg/m³ (dependendo da porosidade), muito poroso, com percentagens de ar a rondar os 80-99,8%, elevada resistência ao fogo, bom isolamento acústico e excelente eficiência enquanto isolante térmico ($\lambda=0,003-0,02$ W/m.K). Relativamente ao isolamento térmico, este material é muito bom isolante à condução e convecção, no entanto mau isolante à radiação, isto é, apresenta uma transmissão solar significativa. É de ainda referir que é um material naturalmente hidrofílico, apesar de não constituir um problema, pois existem tratamentos químicos que revertem esta situação torando-o hidrofóbico (Ibrahim *et al.*, 2015); (Barbero *et al.*, 2014); [W9].



Figura 2.9 Aerogel de sílica no estado granulado e em placa [W10].

Consoante o método de produção, o produto final pode chamar-se xerogel ou aerogel, em que no primeiro o líquido evapora naturalmente criando tensões superficiais que destroem a estrutura frágil e sofrem um encolhimento durante o processo e no segundo o líquido é extraído aumentando a pressão e a temperatura (secagem supercrítica, 100 bar), permitindo uma secagem lenta e sem criar qualquer dano na estrutura molecular [W9]. O aerogel pode ser sintetizado com base em processos mecânicos ou químicos, contudo o método mais corrente e fidedigno é o método químico através do processo sol-gel. Este processo consiste inicialmente, numa reacção de hidrólise, em que compostos orgânicos e inorgânicos reagem, sofrendo uma retração do material e obtendo uma solução composta por partículas de tamanho muito reduzido, cerca de 1-100 nm (sol). Para a obtenção do produto final, a solução sol passa por um processo de aquecimento de modo a remover o solvente, criando uma rede tridimensional (gel) (Huang, 2012).

Apesar de apresentar boas características, o aerogel tem como principal ponto negativo o elevado custo de produção. De modo a comparar o seu custo com outros agregados leves é necessário ter em conta, não só a quantidade de energia que se poupa com a sua aplicação e a poupança monetária associada, como também a energia dispendida na sua produção (custo de produção). Esta relação pode-se resumir no *payback period*, que se define como o tempo que se demora a obter o retorno do investimento. Segundo o estudo realizado por Huang (2012) o *payback period* associado ao aerogel é ainda bastante elevado, estimando-se em cerca de 3,54 anos, quando comparado com outros materiais como EPS e XPS que têm respectivamente 0,22 e 0,07 anos. Garrido (2015) estudou o custo (VAL) associado a argamassas térmicas constituídas por diferentes tipos de aerogéis comerciais tendo em conta várias fases, mais especificamente as fases de produto e construção; de manutenção; de operação e de fim de vida. Este estudo concluiu que a fase de produto e construção é a mais onerosa. A mesma autora estimou que, para tornar as argamassas compostas por aerogel com secagem supercrítica (aerogéis comerciais) economicamente atrativas seria necessária uma redução do custo de aproximadamente 10 vezes.

2.5.2 Sistemas de isolamento compostos por aerogel

A aplicação de aerogel tem ganhado lentamente espaço no mercado da construção, podendo ser utilizado em diferentes produtos. Existem dois tipos de materiais já usados no sector da construção, os *Opaque Silica Aerogel-Based Materials* e os *Translucent Silica Aerogel-Based Materials*. Os primeiros são placas/mantas opacas, em que um dos componentes é aerogel de sílica e os segundos tendo também a presença de aerogel de sílica (formato granulado), têm além de uma baixa condutibilidade térmica um alto coeficiente de transmissão solar, ou seja, é um material translúcido. Relativamente aos *Opaque Silica Aerogel-Based Materials*, na *Aspen Aerogels Inc.* têm sido desenvolvidos diferentes produtos, como o *Spaceloft* (figura 2.10), *Pyrogel* e *Cryogel*, e testado em vários trabalhos experimentais: i) num moinho na Suíça, onde após se isolar termicamente toda a construção, revestindo-a com *Spaceloft* ($\lambda=0,0131 \text{ W/m.K}$), se obteve uma redução do coeficiente de transmissão térmica (U) de $1 \text{ W/m}^2\text{.K}$ para $0,2 \text{ W/m}^2\text{.K}$; ii) no Reino Unido, em que os edifícios testados foram edifícios governamentais, resultou numa redução do U em 44% e uma poupança energética a rondar os 900 kWh/ano (Ibrahim *et al.*, 2015); [W11].

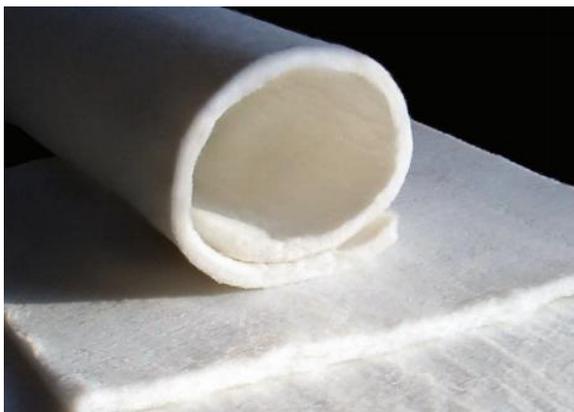


Figura 2.10 Mantas isolantes com aerogel na sua constituição, *Spaceloft* [W11].

Outro trabalho experimental foi realizado na Universidade de Nottingham, onde se construiu uma célula de teste, que inicialmente tinha uma parede exterior constituída por 1,3 cm de gesso laminado, 10 cm de betão, 5 cm de caixa de ar e 10 cm de tijolo e cujo coeficiente de transmissão térmica era de $0,55 \text{ W/m}^2\text{.K}$. Adicionou-se, posteriormente, uma camada de 2 cm de um rolo composto por aerogel de modo a melhorar as propriedades térmicas da referida parede. Os resultados foram positivos, obtendo-se um valor de U inferior ao anterior, $0,30 \text{ W/m}^2\text{.K}$, uma redução de perdas de calor de 46% e ainda uma diminuição significativa de perdas através das pontes térmicas (Cuce *et al.*, 2014).

No que diz respeito a materiais translúcidos, como é o caso das janelas, o mais comum é a utilização de vidros duplos ou até triplos, funcionando o ar como isolante térmico. Apesar de o ar ser ele próprio um isolante razoável, algumas empresas sentiram a necessidade de reduzir

ainda mais as perdas de energia associadas aos envidraçados, colocando gases raros como árgon ou cripton em detrimento do ar, o que melhorou o seu comportamento térmico.

No entanto os estudos foram evoluindo e desenvolveu-se os *Translucent Silica Aerogel-Based Materials*, materiais que combinam o facto de terem uma muito baixa condutibilidade térmica com a sua transparência. Uma empresa alemã, a *ZAE Bayern*, desenvolveu um produto envidraçado composto por uma camada central de aerogel granulado de sílica (16 cm), duas camadas de gás (12 cm cada), podendo ser árgon ou cripton, uma em cada face do granulado e terminando com um vidro simples de cada lado. Este produto tem duas variantes em relação aos granulados, uma menos transparente, *semi-transparent spheres*, e a segunda de transparência elevada, *highly translucent granulates*. Os resultados obtidos após ensaios para o “sistema de iluminação natural” foram de 33-45% em relação à transmissão solar e um coeficiente de transmissão térmica de 0,44-0,56 W/m².K, para o “sistema de proteção solar” os valores foram respetivamente 19-38% e 0,37-0,47 W/m².K (Reim *et al.*, 2002).

Outro estudo, feito em Itália, pretende analisar o desempenho a nível energético de um sistema envidraçado com partículas de aerogel. Para isto, foram construídas duas casas nas mesmas condições, sendo uma de referência e a outra de teste, em que ambas tinham uma janela virada a sul, mas a de referência tinha ar no seu interior, enquanto a janela de teste partículas de aerogel. Após a análise dos dois casos concluiu-se que a transmissão térmica no caso de referência era de 1,5 W/m².K e no que continha o aerogel era de 1 W/m².K, o que demonstra que um sistema que contenha aerogel pode ser uma boa solução de modo a aumentar o conforto e a eficiência energética de um edifício (Cotana *et al.*, 2014).

Os estudos apresentados reforçam a influência positiva que o aerogel pode ter no desempenho térmico de soluções construtivas de edifícios. No âmbito desta dissertação, são analisados os estudos realizados por outros autores em argamassas de desempenho térmico com e sem aerogel.

2.6 Estudos realizados em argamassas de desempenho térmico melhorado

2.6.1 Argamassas térmicas industriais

As argamassas térmicas industriais mais correntes são usualmente compostas por agregados leves de EPS e de cortiça, sobre as quais têm surgido alguns estudos e produtos, promovidos, não só pelas empresas envolvidas no sector, como pela comunidade científica.

Barbero *et al.* (2014) realizaram um estudo, em que reuniram informação relativa a 31 argamassas térmicas a nível europeu, em que 14 são de base cimentícia e/ou ligantes artificiais, 8 de base cimentícia com agregados minerais expandidos e 9 de base cal hidráulica natural. Caracterizaram-nas relativamente à massa volúmica aparente, condutibilidade térmica e ao

preço por metro quadrado (apenas 14 empresas forneceram o último parâmetro). Estes autores compararam a massa volúmica aparente e a condutibilidade térmica e observaram que existe uma relação proporcional, isto é quanto menor a massa volúmica menor a condutibilidade térmica. Por fim, concluíram que as novas argamassas térmicas no mercado europeu devem ter uma massa volúmica aparente inferior a 250 kg/m^3 e com um preço a rondar os $45\text{-}60\text{€}/\text{m}^2$ (valor em relação a $R_x = 1 \text{ m K/W}$). No que diz respeito à condutibilidade térmica, de acordo com a APFAC, no futuro os fabricantes de argamassas térmicas terão como objetivo atingir valores inferiores a $0,05 \text{ W/m.K}$, dado que esse é o valor mínimo praticado atualmente (APFAC, 2016).

Em Portugal, nos últimos anos promoveu-se um estudo relativamente a argamassas térmicas, de modo a entender o seu funcionamento e propriedades. Para isto Gonçalves *et al.* (2012) produziram uma argamassa que incorporasse agregados de muito baixa massa volúmica, cerca de 20 kg/m^3 , em substituição dos agregados recorrentes. O agregado testado foi o Poliestireno Expandido (EPS) dado que possui as características necessárias, como baixa condutibilidade térmica, devido ao ar presente no seu interior após a sua fabricação e baixa absorção de água. O ligante escolhido foi um ligante mineral hidráulico Cimento *Portland* Branco por conferir a durabilidade, aderência ao suporte, coesão e resistência ao fogo pretendida. Adicionou-se ainda materiais de vários tipos, que conferiram maior trabalhabilidade, maior permeabilidade ao vapor de água e introduziram partículas de ar, de maneira a facilitar a aplicação e a dar maior durabilidade à argamassa. O principal objetivo foi reduzir ao máximo a condutibilidade térmica da argamassa, que, com a substituição da areia por EPS em 70-80% em volume, atingiu os $0,069 \text{ W/m.K}$ (T1). Verificou-se ainda uma massa volúmica de 250 kg/m^3 , uma resistência mecânica de classe CSI, de acordo com a norma respetiva e um módulo de elasticidade dinâmico de 500 MPa . A argamassa foi produzida de modo a obter-se um produto final em pó, pois facilita a produção ao nível industrial e a obtenção de uma trabalhabilidade ideal. Os autores deste estudo consideraram o produto obtido: de desempenho térmico elevado; de fácil aplicação, revelando uma simplificação de processos; e de muito baixa tendência para a fissuração, pois possui um módulo de elasticidade baixo e uma expansão livre aceitável. Em suma, obteve-se um resultado positivo e um produto com boas propriedades. Mais recentemente este produto sofreu alguns desenvolvimentos, o que se traduziu numa melhoria ao nível da condutibilidade ($0,05 \text{ W/m.K}$) [W15].

Outro produto de grande desempenho térmico é produzido com substituição total da areia por agregado de EPS (100%) e tem como ligantes a cal e cimento 52,5 N. Esta argamassa apresenta um valor de condutibilidade térmica do mais baixo no mercado nacional, $0,042 \text{ W/m.K}$ (T1), uma massa volúmica aparente relativamente baixa de $150 \pm 50 \text{ kg/m}^3$ e no que se refere à resistência à compressão, apresenta uma classe CSI [W17].

Frade *et al.* (2012) efetuou um estudo com base em argamassas industriais, o qual consistiu na substituição parcial da areia por um granulado de cortiça expandida, agregado leve, em 70-80% em volume. Fizeram ainda parte da constituição da argamassa o cimento de

Portland, como ligante e um hidrófugo. Esta argamassa foi caracterizada em diversas propriedades o que resultou numa condutibilidade térmica de 0,163 W/m.K (T2), numa massa volúmica aparente de 910 kg/m³, uma resistência à compressão de 9,8 MPa e um módulo de elasticidade dinâmico de 1009,8 MPa.

Ainda no campo de argamassas térmicas com agregado leve de cortiça expandida, Vale (2014) estudou uma argamassa industrial, composta por um ligante de Cal hidráulica NHL 3.5, de forma a caracterizá-la, em que alcançou valores díspares relativamente aos obtidos pelo fabricante. Segundo o fabricante desta argamassa térmica, esta é constituída, além da cortiça e da cal, por argila, terra diatomácea, fibras de polipropileno e ainda vários aditivos naturais. Por se caracterizar como uma argamassa térmica, esta evidentemente possui um bom desempenho térmico, com um coeficiente de condutibilidade térmica de 0,045 W/m.K (T1) e uma massa volúmica aparente de 360 ± 20 kg/m³. Apresenta também uma resistência à compressão e um módulo de elasticidade dinâmico não muito baixos, sendo que os valores são respetivamente 1,5 MPa e 742 MPa [W13].

Uma outra argamassa térmica industrial desenvolveu-se no Brasil, e apesar de não apresentar um desempenho térmico similar aos anteriores, ainda assim pode ser classificada como uma argamassa térmica de classe T2, no que diz respeito à condutibilidade térmica. Esta argamassa térmica caracteriza-se por ter uma condutibilidade térmica de 0,2 W/m.K a 25,3°C (0,25 W/m.K a 75°C) e uma massa volúmica aparente de 520 kg/m³. Além de constituída por um composto à base de micaxisto isolante, tem também presente na sua composição argilas minerais, mica e celulose (GRX, 2014).

A caracterização das argamassas térmicas referidas e as propriedades fornecidas pelos fabricantes encontram-se apresentadas, na tabela 2.3.

Em suma, as argamassas térmicas compostas por agregados correntes com percentagens de substituição superiores a 70% obtiveram uma condutibilidade térmica relativamente baixa (0,042 a 0,2 W/m.K), massa volúmica aparente variada entre 150 e 910 kg/m³, uma resistência à compressão dentro dos padrões definidos pelas Normas Europeias, classe CSI (0,4-2,5 MPa) e um módulo de elasticidade dinâmico razoavelmente baixo (140 a 1160 MPa).

Tabela 2.3 Propriedades das argamassas térmicas industriais de agregados correntes.

Autor (Fabricante)	Ligante	Mat. Isolante/ % de substituição	ρ [kg/m ³]	λ [W/m.K]	f_c [MPa]	Ed [MPa]
Gonçalves <i>et al.</i> (2012)	Cimento Portland Branco	EPS / 70-80%	250	0,050	0,4-2,5	500
WSG [W17]* Vieira <i>et al.</i> (2015)	Cal	EPS / 100%	150 ± 50 220	0,042 0,045	0,4-2,5 0,43	- 140
Frade <i>et al.</i> (2012)	Cimento	Cortiça / 70-80%	910	0,163	9,8	1009,8
DS [W13]* Vale (2014)	Cal Hidráulica Natural	Cortiça / n.d.	360 ± 20 642	0,045 0,140	2,7 2,1	742 1160
GRX (2014)*	-	Micaxisto / n.d.	520	0,2	-	-

Legenda: ρ – massa volúmica aparente; λ – coeficiente de condutibilidade térmica; f_c – resistência à compressão; Ed – módulo de elasticidade dinâmica. *Valores indicados pelo fabricante.

2.6.2 Argamassas térmicas compostas por aerogel

No seguimento da melhoria do desempenho das argamassas térmicas, em que se pretende reduzir o coeficiente de condutibilidade térmica para argamassas térmicas num futuro próximo, têm-se testado agregados inovadores, entre os quais o aerogel. Este material pode-se encontrar disponível no mercado introduzido em produtos isolantes como mantas e painéis, que apresentam uma baixa flexibilidade e uma dificuldade de se ajustarem às irregularidades da superfície de aplicação. Tal facto conduziu ao desenvolvimento e estudo de argamassas que incorporem aerogel, mantendo assim as boas propriedades térmicas e diminuindo o problema referido. Contudo, este ainda não é um tema muito aprofundado pela comunidade científica, verificando-se que existem poucos estudos disponíveis (Ibrahim *et al.*, 2015).

Barbero *et al.* (2014), após as suas análises, concluíram que “soluções inovadoras de argamassas térmicas com partículas de aerogel na ordem dos nanómetros, poderiam conduzir a uma contribuição significativa nesta área, atingindo um maior nível de desempenho térmico e com menor espessura”.

Archard *et al.* (2011) foram dos primeiros a desenvolver um revestimento deste género, que consiste numa argamassa espumosa, cujo o local de aplicação prioritário são as paredes exteriores, podendo ser aplicados também na face interior das mesmas, com vista a conferir um comportamento térmico superior à parede. Para medir a condutibilidade térmica foi usado o método da placa quente protegida, em que se determinou que o valor era de 0,0268 W/m.K, ou

seja inferior a materiais de isolamento mais comuns e que a massa volúmica aparente no estado endurecido seco é de 156 kg/m³.

Num ensaio efetuado, com vista à obtenção de argamassas de grande desempenho térmico, introduziu-se 60-90% (em volume) de aerogel de sílica granulado hidrófugo em argamassas térmicas convencionais (amostras de referência). Os ensaios realizaram-se após 28 dias em condições de temperatura a 23°C e com uma humidade relativa de 50%. O método utilizado para a obtenção da condutibilidade térmica foi o *Hot-Plate* (65x65x12mm) e os valores atingiram os 0,025 W/m.K, enquanto que para a massa volúmica aparente correspondente às mesmas amostras verificou-se 200 kg/m³. Os resultados revelaram-se bastante razoáveis quando comparados com argamassas térmicas correntes (Stahl *et al.*, 2012).

Num estudo realizado no Instituto Superior Técnico no âmbito do projeto *NANORENDER*, produziram-se várias argamassas térmicas com vista à análise das suas propriedades. Constatou-se que a argamassa que apresentava melhores resultados no que diz respeito ao desempenho térmico, era constituída unicamente por um agregado leve, aerogel de sílica, e por dois ligantes, cimento e cinzas volantes. Tanto o cimento como as cinzas volantes apresentam a mesma quantidade em volume (10% do volume total), enquanto que o agregado leve representa os restantes 80% do volume total. Com a introdução de constituintes como as cinzas volantes e com o aumento da percentagem de aerogel, verificou-se uma redução de cerca de 28% da condutibilidade térmica em relação a outras argamassas térmicas produzidas neste estudo e uma redução de cerca de 90% comparativamente à argamassa de referência (argamassa sem agregados leves; traço volumétrico 1:4; a/c 1,10). Os valores obtidos foram 0,066 W/m.K (argamassa de melhores propriedades térmicas) e 1,370 W/mK (argamassa de referência) para a condutibilidade térmica e de 418 kg/m³ e 1827 kg/m³ para a massa volúmica aparente, “apresentando uma estrutura porosa com elevada superfície específica e elevada porosidade aberta, cumprindo os requisitos de argamassa leve” (Júlio *et al.*, 2015).

Um instituto Suíço de nome *EMPA* introduziu, em 2013, a tecnologia da adição do aerogel em argamassas no mercado suíço, com o produto *FIXIT 222*, uma argamassa industrial térmica composta por agregados leves de aerogel de sílica. Este produto em 2015 foi “reconhecido como um dos produtos mais inovadores exibidos na *BAU 2015*” (principal feira mundial de arquitetura, materiais e sistemas) [W12]. De acordo com a sua ficha técnica, apresenta propriedades térmicas bastante boas como uma condutibilidade térmica de 0,028 W/m.K e uma massa volúmica aparente de 220 kg/m³. No entanto, em contacto com o fabricante verificou-se uma resistência à compressão compreendida entre 0,3 e 0,4 MPa, isto é, inferior à classificação *CSI* (0,4-2,5 MPa), mesmo quando combinada com a uma emulsão que confere uma melhor resistência à argamassa, nomeada *497 emulsion*.

De modo a estudar-se a influência de agregados de aerogel numa argamassa, Kim *et al.* (2013) testaram uma argamassa composta por uma pasta de cimento e por apenas 2% de

aerogel em massa. Resultou uma redução em 75% da condutibilidade térmica relativamente à argamassas inicial (apenas a pasta de cimento), sofrendo uma melhoria de 0,51 W/m.K para 0,13 W/m.K. Por outro lado, o estudo de Gao *et al.* (2014) concentrou-se na influência do mesmo agregado leve, mas desta feita no betão. Foram inseridas percentagens de 0-60% de aerogel em volume e verificou-se uma redução acentuada nas várias propriedades, como 50 % na massa volúmica aparente (1980 kg/m³ para 1000 kg/m³), 86% na condutibilidade térmica (1,86 W/m.K para 0,26 W/m.K) e ainda 85% na resistência à compressão (55 MPa para 8,3 MPa). Serina *et al.* (2015) analisou o efeito do aerogel (com base num betão de elevado desempenho) tendo como maior foco a resistência à compressão com o objetivo de produzir compostos cimentícios que no mínimo apresentassem uma resistência de 20 MPa aos 28 dias. Resultou que com 20% de aerogel em volume sofreram uma redução em 42% (120 MPa para 70MPa). No entanto, quando adicionada uma maior quantidade de agregados leves, 70% em volume, observou-se uma queda significativa na resistência atingindo os 5,8 MPa. Relativamente ao objetivo proposto, para atingir os 20 MPa, foi necessário incorporar 50% de aerogel em volume ao composto e obteve-se ainda uma condutibilidade térmica de 0,55 W/m.K.

A caracterização das argamassas térmicas de desempenho melhorado, com adição do agregado de aerogel, encontra-se indicada, na tabela 2.4.

Tabela 2.4 Propriedades das argamassas térmicas industriais compostas por agregados de aerogel.

Autor (Fabricante)	Ligante	Mat. Isolante/ % de substituição	ρ [kg/m ³]	λ [W/m.K]	f_c [MPa]	Ed [MPa]
Achard <i>et al.</i> (2011)	-	Aerogel / n.d.	156	0,0268	-	-
Stahl <i>et al.</i> (2012)	-	Aerogel / 60-90%	200	0,025	-	-
Júlio <i>et al.</i> (2015)	Cimento e cinzas volantes	Aerogel / 100%	418	0,066	0,47	304
Cabot*	Cal hidráulica (NHL 5); Cimento branco; Hidróxido de cálcio.	Aerogel / n.d.	220	0,028	0,3-0,4**	-

Legenda: ρ – massa volúmica aparente; λ – coeficiente de condutibilidade térmica; f_c – resistência à compressão; Ed – módulo de elasticidade dinâmica. *Valores indicados pelo fabricante. **Resistência à compressão quando combinada com a 497 emulsion (confere maior resistência).

Os estudos indicados revelam que a introdução de aerogel numa argamassa térmica melhora significativamente a sua massa volúmica aparente, obtendo-se valores entre os 156 e 418 kg/m³ e reduz bastante a condutibilidade térmica, atingindo-se valores compreendidos entre 0,025 e 0,066 W/m.K. Contudo, relativamente à resistência à compressão (grande parte das vezes omissa), com a adição de aerogel a argamassa reduz consideravelmente a sua capacidade resistente, podendo facilmente atingir valores inferiores à classificação estabelecida pela norma EN 998-1 (CEN, 2010). No entanto, a comunidade científica está ciente de que é

bastante difícil manter a resistência com valores de acordo com a norma e por essa razão a classificação encontra-se em discussão. Novas classificações foram apresentadas para argamassas térmicas com agregados de EPS, Fpr EN 16025-1 (CEN, 2012) e classificações semelhantes poderão ser efetuadas considerando diferentes agregados leves, nomeadamente aerogel, uma vez que apresentam resistências igualmente inferiores à classe CS I.

Por último, também se observam comportamentos não lineares ou reprodutíveis entre vários estudos o que levanta questões ao nível das argamassas preparadas ou da metodologia de medição da condutibilidade térmica.

2.7 Síntese do capítulo

Com base em estudos realizados relativamente aos gastos energéticos nos diversos sectores económicos, conclui-se que o sector da construção é o que mais energia consome. O maior fator para esta contribuição é a energia utilizada no aquecimento e arrefecimento das habitações (Enerdata, 2012).

Para solucionar esta problemática diversos materiais e sistemas de isolamento têm sido desenvolvidos e ocupado o seu lugar no mercado construtivo. Um desses sistemas são os ETICS, que se caracterizam por ser um bom sistema de isolamento exterior. Apesar de revelar bastantes pontos positivos, a necessidade de mão-de-obra especializada e a impossibilidade de aplicação em zonas irregulares, especialmente e contexto de reabilitação, são aspetos de relevo que justificam o desenvolvimento de argamassas térmicas (compostas por agregados leves isolantes em substituição dos agregados correntes de areia).

Após estudos laboratoriais e análises dos fabricantes a estas argamassas, constata-se que é uma solução a considerar, com muito boas propriedades e com um potencial elevado de aplicação, possibilitando a exploração de outros agregados leves na sua composição. Verificou-se pela literatura técnica que a incorporação de nanomateriais, como o aerogel de sílica, permite melhorar ainda mais o desempenho térmico das argamassas, com reduções de 50-65% no que respeita à condutibilidade térmica, quando comparadas com argamassa térmicas correntes (0,07-0,05 W/m.K)

Tendo como base a recolha bibliográfica efetuada pode-se retirar alguns aspetos de maior relevância. As argamassas térmicas de desempenho melhorado atingem classificações de T1 ($\lambda \leq 0,10$ W/m.K) no que respeita à condutibilidade térmica e nos casos com agregados isolantes inovadores, revelam-se inferiores às obtidas pelos ETICS (0,035 W/m.K). Apresentam ainda uma massa volúmica aparente bastante variada, tendo como valores mínimos 150-200 kg/m³ e um módulo de elasticidade dinâmico razoavelmente baixo, o que é relevante para um bom comportamento à fendilhação (150-1000 MPa). Quanto à resistência à compressão, em relação às argamassas térmicas de agregados correntes de EPS e cortiça, os valores encontram-

se dentro dos padrões definidos pelas Normas Europeias, classe CSI (0,4-2,5 MPa), no entanto tendencialmente os valores da resistência são baixos.

O aerogel tem-se revelado um agregado leve de grande desempenho térmico e suficientemente flexível para a sua aplicação em argamassas térmicas, podendo representar uma aplicação futura nas argamassas de isolamento térmico.

No seguimento dessa ideia, surgiu a possibilidade da realização de um estudo que avaliasse a influência da adição de aerogel em argamassas térmicas (com maior incidência no desempenho térmico), de modo a contribuir para o estudo e desenvolvimento de novas formulações. No capítulo seguinte é detalhada a caracterização e descrição das argamassas produzidas e ensaios realizados durante toda a campanha experimental.

3 Caracterização do trabalho experimental

3.1 Considerações gerais

Neste capítulo, pretende-se descrever os procedimentos experimentais necessários para a avaliação do comportamento térmico e mecânico de argamassas térmicas industriais com a introdução de aerogel na sua constituição.

Serão detalhados todos os ensaios, procedimentos e materiais utilizados nesta campanha experimental, com vista a elucidar relativamente ao trabalho realizado para a caracterização das argamassas produzidas.

Esta caracterização passa pela análise das argamassas em estado fresco, isto é, durante a sua produção, e no estado endurecido. No estado fresco determina-se a massa volúmica aparente e no estado endurecido avalia-se a massa volúmica aparente da argamassa endurecida, a condutibilidade térmica, a resistência à compressão, o módulo de elasticidade dinâmico e o módulo de torção.

No estado endurecido caracterizou-se as argamassas em dois instantes, aos 28 e aos 31 dias. No primeiro (28 dias) as amostras foram sujeitas a condições da câmara de cura seca (temperatura a $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ e uma humidade relativa de $65\% \pm 5\%$), denominando-se estado endurecido húmido. Num segundo momento, após 3 dias na estufa elétrica a 60°C (totalizando 31 dias desde a sua produção), em condições de meio ambiente, determinou-se a massa volúmica aparente e a condutibilidade térmica. Este estado designa-se por estado endurecido seco.

3.2 Descrição do plano de ensaios

Esta campanha experimental, constituída por 3 fases distintas, foi realizada com vista a uma análise e comparação das propriedades térmicas e mecânicas de argamassas térmicas de diferentes constituições. Para isso, numa primeira fase, foram produzidas 12 argamassas térmicas, tendo 6 delas como base da mistura uma argamassa industrial composta por agregados leves de EPS (A^{Eps}) e as restantes 6 por outra argamassa industrial constituída por agregados leves de perlite (A^{Perlite}). A estas argamassas industriais foi adicionado aerogel de sílica, em diferentes quantidades, permitindo o estudo da sua influência ao nível do seu desempenho térmico e mecânico, analisando assim a quantidade ótima que confere as melhores características possíveis à argamassa.

Para cada uma das argamassas industriais foi produzida uma amostra de referência, ou seja, com 0% de aerogel adicionado e cinco amostras com percentagens de aerogel adicionado de 25%, 56%, 119%, 133% e 181% da massa total da argamassa industrial, tal como indicam as tabelas 3.1 e 3.2. A quantidade de água utilizada em cada mistura foi determinada durante a

produção, de acordo com a trabalhabilidade e a capacidade de aglutinação dos componentes da argamassa.

Tabela 3.1 Quantidades utilizadas na produção das argamassas com agregados EPS.

Designação	Aerogel/A ^{Eps}	A ^{Eps} [g]	Aerogel [g]	Total [g]	H ₂ O [g]	H ₂ O/Pó
A ⁰	0	100,00	0,00	100,00	120,00	1,20
A ²⁵	0,25	40,00	10,00	50,00	80,00	1,60
A ⁵⁶	0,56	40,00	22,50	62,50	80,00	1,28
A ¹¹⁹	1,19	40,00	47,50	87,50	110,00	1,26
A ¹³³	1,33	40,00	53,00	93,00	140,00	1,51
A ¹⁸¹	1,81	40,00	72,50	112,50	225,00	2,00

Tabela 3.2 Quantidades utilizadas na produção das argamassas com agregados de perlite.

Designação	Aerogel/A ^{Perlite}	A ^{Perlite} [g]	Aerogel [g]	Total [g]	H ₂ O [g]	H ₂ O/Pó
S ⁰	0	70,00	0,00	70,00	105,00	1,50
S ²⁵	0,25	50,00	12,50	62,50	83,00	1,33
S ⁵⁶	0,56	50,00	28,00	78,00	98,00	1,26
S ¹¹⁹	1,19	50,00	59,50	109,50	150,00	1,37
S ¹³³	1,33	50,00	66,50	116,50	165,90	1,42
S ¹⁸¹	1,81	50,00	90,50	140,50	198,00	1,41

Relativamente aos provetes, foram utilizados diferentes tipos de provetes com vista a ensaios distintos a realizar aos 28 dias em que a descrição referente aos mesmos se apresenta na tabela 3.3.

Tabela 3.3 Descrição dos provetes utilizados na primeira fase do trabalho experimental.

Provetes	Ensaio	Quantidade	Dimensões [mm]	Volume [cm ³]
Cilíndrico reduzido	Condutibilidade térmica	24	60x20	56,55
Prismático cúbico	Resistência à compressão	12	40x40x40	64,00
Prismático alongado	Módulo de elasticidade dinâmico	12	80x20x20	32,00

Legenda: Dimensões dos provetes cilíndricos definem-se por [D] x [h] e dos prismáticos por [L] x [l] x [h] (D - diâmetro da amostra; h - altura; L - comprimento; l - largura).

Produziu-se um total de 48 amostras, 24 em que se utilizou a argamassa industrial A^{Eps} e outras 24 com a utilização de A^{Perlite}. Para cada argamassa em estudo produziu-se ainda 4

amostras cada uma associada a um ensaio distinto. Os provetes encontram-se ilustrados na figura 3.1.



Figura 3.1 Provetes utilizados na primeira produção de argamassas.

Como mostra a tabela 3.3, para a caracterização das argamassas quanto ao seu desempenho térmico foram produzidas amostras cilíndricas (figura 3.1), com o objetivo da utilização de uma sonda de contacto. No entanto, devido ao facto da gama de valores detetados por esta sonda para certas argamassas não ser o mais indicado (elevado), foram, posteriormente, produzidas amostras que permitissem o uso de uma sonda de agulha, destinada a gamas de valores inferior à sonda de contacto ($0,04 - 0,3 \text{ W/m.K}$), mais especificamente, compreendidos entre $0,01 - 0,05 \text{ W/m.K}$.

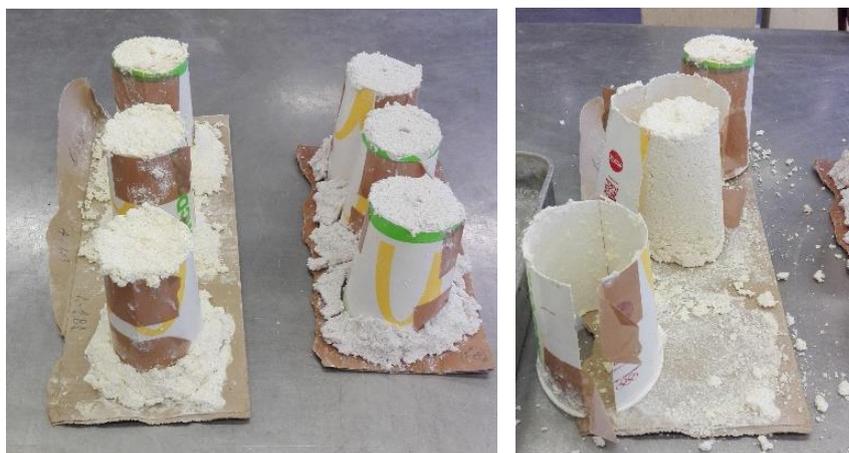


Figura 3.2 Provetes utilizados na segunda produção de argamassas.

Nesta segunda fase, para a produção destas amostras foram utilizados moldes cilíndricos de cartão plastificado em base de cartão, com diâmetro de 80 mm e altura de 130 mm, aproximadamente. Produziram-se 6 amostras, em que 3 delas têm como base a argamassa industrial A^{Eps} ($A^{119}, A^{133}, A^{181}$) e as restantes a A^{Perlite} ($S^{119}, S^{133}, S^{181}$). As amostras podem-se observar na figura 3.2.

De modo a validar os resultados da condutibilidade térmica obtidos anteriormente pela sonda de agulha, procedeu-se, numa terceira e última fase, à produção de amostras em dois provetes diferentes, com o intuito de comparar valores; para a mesma argamassa utilizaram-se métodos de medição distintos. Produziram-se 8 amostras, em 4 das quais se utilizaram provetes cilíndricos de 50mm de diâmetro e 130mm de altura, com vista à aplicação da sonda de agulha e nas restantes 4, provetes prismáticos de 330x330x30mm³ para a aplicação do método *Heat Flow Meter (HFM)*, ambos para a determinação da condutibilidade térmica da argamassa. Para estas produções escolheram-se as argamassas A¹⁰⁰, A¹³³, S¹⁰⁰ e S¹³³, por se enquadrarem com os objetivos pretendidos. Os 8 provetes podem observar-se na figura 3.3.



Figura 3.3 Provetes utilizados na terceira produção de argamassas.

As quantidades utilizadas na terceira produção, tanto para as argamassas com agregados de EPS, como para as de agregados de perlite, estão indicadas nas tabelas 3.4 e 3.5. Pode-se constatar que a relação H₂O/Pó é ligeiramente superior comparativamente com as argamassas equivalentes, produzidas nas duas primeiras fases.

Tabela 3.4 Quantidades utilizadas na produção das argamassas de EPS na terceira fase.

Designação	Aerogel/A ^{EPS}	A ^{EPS} [g]	Aerogel [g]	Total [g]	H ₂ O [g]	H ₂ O/Pó
A ¹⁰⁰	1,00	200,00	200,00	400,00	631,00	1,58
A ¹³³	1,33	200,00	266,00	466,00	790,00	1,70

Tabela 3.5 Quantidades utilizadas na produção das argamassas de perlite na terceira fase.

Designação	Aerogel/A ^{Perlite}	A ^{Perlite} [g]	Aerogel [g]	Total [g]	H ₂ O [g]	H ₂ O/Pó
S ¹⁰⁰	1,00	200,00	200,00	400,00	631,00	1,58
S ¹³³	1,33	200,00	266,00	466,00	790,00	1,70

3.3 Caracterização dos materiais constituintes das argamassas

Nesta produção, como mencionado, foram utilizadas duas argamassas industriais de composição distintas (A^{EPS} e $A^{Perlite}$) e um material de elevadas propriedades térmicas, o aerogel sílica. Seguidamente descrevem-se as características dos materiais constituintes e das argamassas industriais.

3.3.1 Argamassa industrial A^{EPS}

Esta argamassa, denominada argamassa industrial A^{EPS} , é um produto melhorado de forma a proporcionar um desempenho térmico elevado da superfície de aplicação e é usualmente utilizado para isolamento tanto de paredes novas como reabilitadas.

É um produto de isolamento térmico contínuo de base mineral, de cor amarelada e composto por ligantes minerais (cal e cimento), cargas minerais, adjuvantes especiais (reológicos, introdutores de ar, resina e hidrófugos de massa) e cargas leves, em particular agregados de EPS. As propriedades principais desta argamassa industrial encontram-se indicadas na tabela 3.6.

Tabela 3.6 Propriedades físicas da argamassa industrial A^{EPS} [W17].

Massa volúmica aparente do pó	140 ± 2,5 kg/m ³
Massa volúmica aparente de pasta	350 ± 7.5 kg/m ³
Massa volúmica aparente endurecido	150 ± 5,0 kg/m ³
Condutibilidade térmica (λ):	0,042 W/m.K (T1)
Resistência a compressão	Categoria - CSI (0,4-2,5 N/mm ²)

3.3.2 Argamassa industrial $A^{Perlite}$

Do mesmo modo que a A^{EPS} , a argamassa industrial $A^{Perlite}$ é também ela um produto de melhoria do desempenho térmico de uma superfície, no entanto de diferente composição. Este material é uma argamassa de revestimento ainda em estudo num laboratório industrial e pode ser designada como um reboco super isolante (RSI).

Contém na sua constituição ligantes minerais, como cimento de *Portland* e outros cimentos reativos e ainda agregados leves de perlite expandida.

3.3.3 Aerogel de sílica

O aerogel de sílica é um material de elevadas capacidades de isolamento térmico e que pode tomar diferentes finalidades e formatos.

Neste trabalho experimental foi utilizado como agregado leve em adição às argamassas térmicas industriais, conferido assim ao material uma massa volúmica ainda mais baixa e melhores propriedades térmicas.



Figura 3.4 Aerogel utilizado nas produções.

O aerogel de sílica utilizado, é um agregado de formato granulado (figura 3.4), considerado translúcido, amorfo, hidrofóbico e foi produzido por secagem supercrítica. Apresenta uma durabilidade e resistência à humidade e ao calor bastante substancial. É um material não tóxico quando inflamado ou exposto a elevadas temperaturas e apresenta ainda capacidade de manter as propriedades térmicas após ser presente a ciclos de envelhecimento acelerado a 200 °C num ambiente húmido saturado. As principais características do material estão indicadas na tabela 3.7 [W14].

Tabela 3.7 Propriedades físicas do aerogel de sílica utilizado [W14].

Tipo de partículas	Granulado
Dimensões das partículas	0.01 - 4 mm
Massa volúmica aparente	60 - 100 kg/m ³
Diâmetro dos poros	8 - 25 nm
Condutibilidade térmica	0,018-0,020 W/m.K - (dependendo da granulometria)

3.4 Produção das argamassas

Para a produção das argamassas referidas (A^{Eps} e $A^{Perlite}$), seguiu-se o processo descrito, de modo a que as condições sejam semelhantes para todas as argamassas, podendo assim realizar-se uma análise comparativa e obter resultados fiáveis. O processo descrito teve como base a NP EN 196-1 (IPQ, 2006), com ligeiras adaptações.

- Em primeiro lugar procedeu-se à pesagem do produto em pó e do aerogel, utilizando a balança com uma precisão de 0,01 g;
- Misturou-se o produto em pó com o agregado (aerogel) num saco de plástico, de modo a homogeneizar o material;
- Retirou-se o material do interior do saco, colocou-se no recipiente misturador e de seguida acrescentou-se aos poucos a água necessária, enquanto se misturava manualmente com uma espátula toda a mistura (figura 3.5 a, b). Procedeu-se deste modo até que a argamassa tivesse a consistência ideal, isto é, propriedades aderentes e trabalhabilidade. Os dados referentes às quantidades de água utilizada para cada argamassa estão indicados na tabela 3.1 e 3.2;
- Quando atingida a quantidade de água necessária, realizou-se a mistura mecânica a uma velocidade de rotação lenta e durante 120s;
- Removeu-se o material aderente às paredes do recipiente, com a ajuda de uma espátula, juntando-o ao restante;
- Com a argamassa preparada determinou-se a massa volúmica da mesma, com o auxílio de um recipiente metálico, de volume conhecido (200 ml) e mediu-se a sua massa (figura 3.5 c).

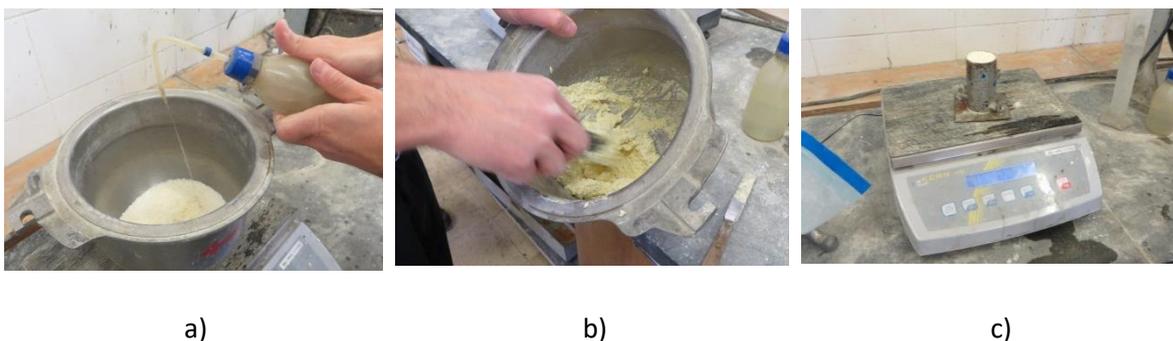


Figura 3.5 Mistura e preparação da argamassa (a, b) e determinação da sua densidade (c).

- Após a devida limpeza e a colocação das peças do molde no devido local, convenientemente montadas, aplicou-se óleo descofrante;
- Colocou-se a argamassa no interior dos moldes em duas camadas, em que em ambas as camadas foram compactadas 25 vezes com o auxílio de um pilão destinado para o efeito (figura 3.6);

- Alisou-se a superfície com uma espátula;



Figura 3.6 Preparação dos provetes.

- Colocaram-se os moldes num saco de polietileno e dentro da câmara de cura seca a temperatura ambiente ($20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$) e com uma humidade relativa de $65\% \pm 5\%$. Os provetes permaneceram neste local durante 7 dias;
- Terminando este período, procedeu-se à descofragem dos provetes, mantendo-os na câmara até aos 28 dias, data em que se realizaram os ensaios em estado endurecido.

Este processo foi repetido em todas as produções, apenas alterando as quantidades de aerogel, argamassa industrial e água. As quantidades encontram-se na tabela 3.1 e 3.2.

Relativamente à segunda e terceira produções, feitas com vista à utilização da sonda de agulha (ensaio à condutibilidade térmica), houve a necessidade de executar uma ligeira perfuração ainda em estado fresco. Esta perfuração efetua-se por se ter verificado, ao inserir a sonda, a fratura da amostra em estado endurecido, devido à variação do volume. Para esta perfuração foi utilizada a própria sonda de agulha, de modo a que o orifício apresentasse as mesmas dimensões da sonda (cerca de 4mm de diâmetro), mantendo-se assim, no momento dos ensaios no estado endurecido, a sonda suficientemente justa à amostra.

3.5 Caracterização das argamassas em estado fresco

3.5.1 Massa volúmica aparente da argamassa em pasta

Segundo a norma EN 1015-6 (CEN, 1998), a massa volúmica aparente de uma amostra é definida pela razão entre a sua massa e o volume, tendo como simbologia a letra grega ρ e como unidade S.I. kg/m^3 .

$$\rho = \frac{m_2 - m_1}{V} \quad (3.1)$$

em que:

ρ – Massa volúmica aparente da amostra [kg/m³];

m_1 – Massa da do recipiente [kg];

m_2 – Massa total da amostra [kg];

V – Volume da amostra [m³].

Para a determinação desta propriedade da argamassa em estado fresco foi definido um processo com base na norma europeia EN 1015-6 (CEN, 1998), com algumas adaptações, em que houve a necessidade de utilizar um recipiente, uma balança de precisão 0,01g e uma espátula.

- Em primeiro lugar realizou-se a medição do volume e da massa do recipiente a utilizar neste processo, tarando-o no imediato (utilizou-se um recipiente de 200 ml, apesar de segunda a norma se definir mais indicado um recipiente de aproximadamente 1L, o que poderá causar alguma incerteza adicional na sua determinação);
- De seguida, procedeu-se ao enchimento de metade do recipiente com a argamassa em estudo e à posterior compactação com 5 pancadas verticais;
- Por último, encheu-se o restante volume do recipiente, repetiu-se as 5 pancadas verticais, alisou-se a superfície do recipiente, tirando o excesso e determinou-se a massa da amostra (as pancadas referidas substituem a mesa vibratória estipulada nas normas europeias).

Tendo em conta a expressão indicada na equação 3.1, calculou-se a massa volúmica aparente da argamassa em estado fresco.

3.6 Caracterização das argamassas em estado endurecido

3.6.1 Massa volúmica aparente da argamassa endurecida

A massa volúmica aparente de uma argamassa endurecida, tem o mesmo princípio de cálculo que em estado fresco, isto é, define-se pela razão entre a massa e o volume (razão definida na norma EN 1015-10 (CEN, 1999), e foi determinada com a pesagem das amostras cilíndricas com destino ao ensaio à condutibilidade térmica (tabela 3.3). Isto é possível dado que este ensaio é não destrutivo e mantém as amostras intactas para os ensaios posteriores. Os equipamentos utilizados foram a balança de precisão 0,01g e uma craveira digital, para a medição da massa e do volume das amostras respetivamente.

Este ensaio efetuou-se em condições ambiente, ou seja, 20°C ± 5°C e ao fim de 28 dias, período geralmente aceite no que diz respeito à cura de argamassas. Após a secagem das

amostras na estufa elétrica 60°C durante 3 dias estas ensaiaram-se novamente, nas mesmas condições ambiente.

3.6.2 Ensaio à condutibilidade térmica da argamassa endurecida

A condutibilidade térmica é uma característica dos materiais que indica a quantidade de energia que é transmitida por metro com o incremento de um grau e que tem como unidade S.I. W/m.K. Para a sua determinação recorreu-se ao equipamento *ISOMET* 2114 (2104) utilizando o método transiente e a um equipamento que aplica o método *Heat Flow Meter (HFM)*, isto é, um método estacionário.

O equipamento *ISOMET* 2114 (2104), consiste num aparelho de medição portátil que pode ser equipado com uma sonda de contacto ou de agulha, neste caso mais aconselhada para valores numa gama inferior a 0,05 W/m.K (figura 3.7).



Figura 3.7 Ensaio da condutibilidade térmica com a sonda de contacto e de agulha.

Tal como o ensaio da massa volúmica aparente, ensaiou-se as amostras em dois momentos. Ao fim dos 28 dias em que se retirou as amostras da câmara de cura seca e aos 31 dias, após a sua secagem na estufa elétrica. Em ambas as situações as condições atmosféricas consideram-se meio ambiente, 20°C ± 5°C.

Relativamente às dimensões aproximadas das sondas utilizadas, a de contacto tem 60 mm de diâmetro e a de agulha 4 mm de diâmetro e de altura 110 mm.

Para a realização deste ensaio foi necessário:

- Ligar o aparelho à corrente;
- Ligar a sonda de contacto/agulha ao aparelho;
- Colocar a amostra numa placa de EPS, com a superfície de menor rugosidade voltada para cima, de modo a otimizar o contacto entre a amostra e a sonda, no caso da sonda de contacto. No caso da sonda de agulha, a superfície não tem qualquer importância, mas ter em atenção o facto de sonda estar justa à amostra;
- Colocar a sonda em contacto/no interior da amostra;

- Ligar o equipamento premindo o botão *Power* durante 3 segundos;
- Definir a gama de valores esperados, 0,04 – 0,3 W/m.K para a sonda de contacto e 0,015 – 0,05 W/m.K para a de agulha (valores indicados na ficha técnica *ISOMET 2114*);
- Premir tecla F1;
- Ao fim de cerca de 30 min, assim que terminar a análise, é possível consultar os resultados premindo a tecla F4.

No caso dos ensaios após a secagem das amostras o procedimento é semelhante, com a pequena ressalva de que no momento de as retirar da estufa elétrica, envolvê-las com papel aderente, de modo a que durante o processo de medição dos valores, estas não absorvam qualquer humidade que possa contaminar a amostra. Garantir ainda que as amostras são arrefecidas a temperatura ambiente antes de proceder às medições.

Em relação aos ensaios com a sonda de agulha, note-se que o ensaio se efetuou com a penetração completa da agulha até que esta se situasse a cerca de 20 mm da extremidade da amostra e em condições atmosféricas de temperatura meio ambiente, $20^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$.

O outro equipamento utilizado para a determinação do coeficiente de condutibilidade térmica das argamassas baseia-se no método estacionário de fluxo de calor, *Heat Flow Meter (HFM)*. Este método consiste na emissão de um fluxo de calor, em condições estacionárias, através da amostra, entre duas placas de temperaturas distintas (313,15K e 333,15K ou 40°C e 60°C), embora constantes ao longo de todo o ensaio. Todo o sistema é envolvido por um isolante térmico ($\lambda \cong 0,035 \text{ W/m.K}$), de modo a reduzir a perdas de calor e a placa quente é protegida por um anel de guarda, que garante um fluxo de calor unidirecional. As dimensões das amostras utilizadas são de $330 \times 330 \times 30 \text{ mm}^3$. O ensaio foi realizado por uma entidade externa e como descrito por Senff *et al.* (2016). Este foi monitorizado durante um período mínimo 12 horas, para garantir a estabilização do valor de fluxo térmico. A representação esquemática da medição da condutibilidade térmica através do método *HFM*, com dois transdutores de fluxo de calor e uma amostra, pode ser observada na figura 3.8.

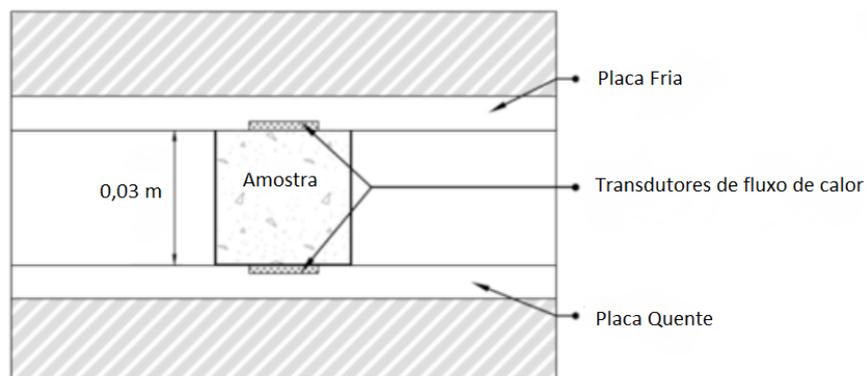


Figura 3.8 Representação esquemática do ensaio *HFM* (adaptado de Senff *et al.*, 2016).

O procedimento experimental aplicado segue as normas ASTM C518 (ASTM, 2010) e baseia-se nas seguintes instruções (Melo, 2014):

- Conexão do equipamento a um sistema de refrigeração, de modo a manter as temperaturas constantes ao longo de todo o ensaio;
- Posicionar a amostra no interior do aparelho, paralelamente às placas, e ajustar as placas à amostra;
- Monitorizar o fluxo de calor e as temperaturas de ambas as placas ao longo de 12 horas;
- Define-se como critério de paragem do ensaio, quando não se verificar variação do fluxo de calor em duas medições consecutivas.

Com base na lei de Fourier, calcula-se o coeficiente de condutibilidade térmica de acordo com a equação 3.2 (Senff *et al.*, 2016).

$$\lambda = \frac{S'E' * S''E''}{2} * \frac{L}{\Delta t} \quad (3.2)$$

Onde:

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'' – Valor do fluxo de calor obtido pelos transdutores (V);

L – Distância entre as placas ou espessura da amostra (mm);

Δt – Variação da temperatura através da amostra (°C).

Devido ao facto de a condutibilidade térmica variar com as condições de humidade e temperatura, e que os ensaios efetuados através do método *HFM* terem sido realizados a temperaturas superiores aos restantes ensaios, é necessário converter os valores de *HFM*, de modo a serem comparáveis com os valores obtidos pelos outros métodos. Segundo a norma ISO 10456, os valores podem 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%; sendo que, com a exceção dos valores obtidos pelo método *HFM*, todos os ensaios foram efetuados em condições semelhantes às descritas em IIa) e IIb). Segundo Gomes *et al.* (2017), para estas condições a conversão considerada está descrita nas equações 3.3 e 3.4.

$$F_i = e^{f_i(i_2-i_1)} \quad (3.3)$$

Onde:

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 valor da condutibilidade térmica convertido obtém-se através da equação 3.4.

$$\lambda_2 = \lambda_1 * F_T * F_\psi * F_\alpha \quad (3.4)$$

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;

3.6.3 Ensaio à resistência mecânica da argamassa endurecida

Este ensaio tem como objetivo a determinação da resistência à compressão do material em causa e para tal utilizou-se o equipamento *SEIDNER Form + Test* (modelo 05/200/10 DM 1) com célula 200 KN. Segundo a norma EN 1015-11 (CEN, 1999) realizou-se, aos 28 dias, o ensaio para as 12 argamassas, ou seja, com 6 percentagens diferentes de aerogel para A^{Eps} e $A^{Perlite}$, incluindo a de referência.

Após a colocação correta da amostra no equipamento, isto é, com a superfície mais irregular para um dos lados, de modo a que as duas faces lisas estejam em contacto com os

pratos, fez-se elevar o prato inferior levando o provete à rotura por compressão, como se pode observar na figura 3.9.



Figura 3.9 Realização do ensaio da resistência à compressão.

O resultado medido pelo aparelho é relativo ao valor máximo em kN da carga aplicada e para a determinação da resistência é necessário calcular a razão entre esta e a área de contacto. Note-se que área de contacto (A_c) foi de 1600 mm² (40x40 mm), ver equação 3.5.

$$f_c = \frac{F_c}{A_c} \quad (3.5)$$

Onde:

f_c – Resistência à compressão da amostra [MPa];

F_c – Carga aplicada pelo prato inferior [kN];

A_c – Área da amostra em contacto com o prato [mm²].

3.6.4 Ensaio ao módulo de elasticidade dinâmico da argamassa endurecida

Para a determinação do módulo de elasticidade dinâmico foi necessária a utilização do equipamento *GrindoSonic MK5 "industrial"* com vista à medição do modo de vibração à flexão e à torção (que permite a determinação do coeficiente de *Poisson*) e uma balança com precisão de 0,01 g.

Os ensaios foram realizados, aos 28 dias, com provetes de 80x20x20 mm, baseados na norma ASTM E1876-01 (ASTM, 2006) e no manual do equipamento, e que o seguinte procedimento foi aplicado:

- Em primeiro lugar mediu-se a massa da amostra e registou-se o valor;
- Colocou-se a amostra numa base esponjosa;
- Conectou-se a agulha ao aparelho e ligou-se o mesmo;

- Posicionou-se a agulha e aplicou-se várias pancadas secas na amostra até o valor obtido estabilizar (o local onde posicionar a agulha está definido no manual do equipamento, tanto para o modo de vibração à flexão, como para o de torção e pode observar-se na figura 3.10).

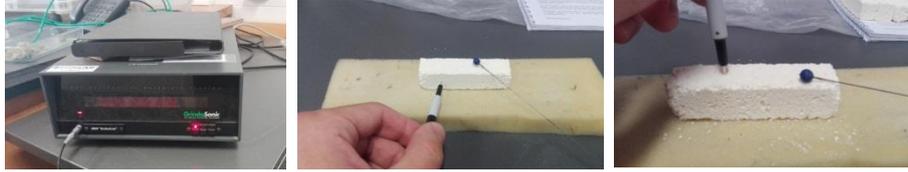


Figura 3.10 Ensaio para a determinação do modo de vibração à flexão e à torção.

Pode então determinar-se o módulo de elasticidade dinâmico através da equação 3.6.

$$E = 0,9456 \frac{m * f_f^2}{b} * \frac{L^3}{t^3} * C1 \quad (3.6)$$

Em que:

m – Massa da amostra [g];

f_f – Frequência do modo de vibração à flexão [Hz];

b – Largura da amostra [mm];

L – Comprimento da amostra [mm];

t – Espessura da amostra [mm];

C1 – Fator de correção para o modo de flexão fundamental, tendo em conta a espessura finita do provete e coeficiente de *Poisson*.

No entanto, com o equipamento é disponibilizado um software, *GENEMOD*, que determina tanto o módulo de elasticidade, como o módulo de torção e o coeficiente de *Poisson*, inserindo os dados necessários ao seu cálculo, como as dimensões da amostra e a sua massa.

3.7 Síntese do capítulo

Ao longo deste trabalho experimental foram produzidas 14 argamassas distintas, sete delas tendo como base uma argamassa industrial de agregados leves de EPS e as restantes sete com base uma argamassa industrial de agregados leves de perlite expandida, onde as sete

argamassas distintas para cada argamassa industrial, são constituídas por diferentes quantidades de aerogel.

Foram produzidos cinco tipos de amostras para cada argamassa, com moldes distintos, com o objetivo de caracterizar as mesmas relativamente à condutibilidade térmica (*HFM*, sonda de contacto e de agulha), resistência à compressão e ainda ao módulo de elasticidade dinâmico.

Caracterizou-se todas as argamassas no seu estado fresco, numa fase inicial da campanha (dia da produção) e no estado endurecido, tanto ao fim de 28 dias na câmara de cura seca, como após 3 dias de secagem na estufa a 60 °C (31 dias).

Na tabela 3.8 encontra-se indicado o número de ensaios realizados para cada argamassa térmica ao longo da campanha experimental, que totalizam 141 ensaios. Os resultados obtidos nestes ensaios são apresentados e analisados no capítulo 4.

Tabela 3.8 Total de ensaios realizados durante a campanha experimental.

Argamassas		Ensaio	Massa volúmica aparente		Condutibilidade térmica				Resistência à compressão	Módulo de elasticidade dinâmico	
		Norma	EN 1015-10		-				EN 1015-11	ASTM E1876-1	
		Equipamento	Balança 0,01g	ISOMET 2114 (2104)				HFM	SEIDNER Form + Test (modelo 05/200/10 DM 1)	GrindoSonic MK5 "industrial"	
				Sonda de contacto		Sonda de agulha					
		Provetes	60x20	60x20		80x130 e 50x130		330x330x30	40x40x40	80x20x20	
Dias	28	31	28	31	28	31	31	28	28		
Argamassa industrial <i>A^{EPS}</i>	A ⁰	Nº Ensaio	2	2	2	2	-	-	-	1	2
	A ²⁵		2	2	2	2	-	-	-	1	2
	A ⁵⁶		2	2	2	2	-	-	-	1	2
	A ¹⁰⁰		1	1	-	-	1	1	1	-	-
	A ¹¹⁹		2	2	2	2	1	1	-	1	2
	A ¹³³		2	2	2	2	2	2	1	1	1
	A ¹⁸¹		2	2	2	2	1	1	-	1	1
Argamassa industrial <i>A^{Perlite}</i>	S ⁰		2	2	2	2	-	-	-	1	1
	S ²⁵		2	2	2	2	-	-	-	1	-
	S ⁵⁶		2	2	2	2	-	-	-	1	1
	S ¹⁰⁰		-	-	-	-	-	-	-	-	-
	S ¹¹⁹		2	2	2	2	1	1	-	1	1
	S ¹³³		2	2	2	2	-	-	-	1	1
	S ¹⁸¹		2	2	2	2	1	1	-	1	1
Total de ensaios			25	25	24	24	7	7	2	12	15

4 Apresentação e discussão de resultados

4.1 Considerações gerais

Neste capítulo pretende-se avaliar os resultados obtidos ao longo do trabalho experimental, discutindo e comentando-os, de modo a caracterizar as propriedades referentes ao comportamento mecânico e desempenho térmico das diferentes argamassas industriais térmicas em estudo.

4.2 Caracterização das argamassas no estado fresco

4.2.1 Adição de água e trabalhabilidade das argamassas

Devido à reduzida fluidez das argamassas produzidas, não é de grande relevância a realização do ensaio de espalhamento, porque dificilmente se obtém uma correspondência entre uma trabalhabilidade aceitável e um valor segundo proposta normativa EN 998-1 (CEN, 2010). Como tal, o ensaio referido não foi efetuado nem analisado no decorrer desta campanha experimental.

A quantidade de água adicionada a cada argamassa, determinou-se consoante a trabalhabilidade apresentada pela mesma. Durante as produções, verificou-se uma diminuição de trabalhabilidade com o aumento da quantidade de aerogel, para a mesma quantidade de água.

No que se refere às argamassas A^{Eps} , todas as argamassas produzidas, isto é, até uma relação Aerogel/ A^{Eps} de 1,81, apresentam uma boa trabalhabilidade, como se pode observar na figura 4.1.

O mesmo não se pode afirmar para as argamassas $A^{Perlite}$, dado que se verificou alguma dificuldade na sua produção com boa trabalhabilidade. Este facto foi especialmente notório para as argamassas de maior relação Aerogel/ $A^{Perlite}$ (S^{133} e S^{181}), tendo em conta as quantidades de água utilizadas (figura 4.2). As razões pelas quais se detetou uma fraca trabalhabilidade nestas argamassas, passam por uma reduzida quantidade de materiais aglutinantes na mistura e pela argamassa industrial se caracterizar como de presa acelerada, o que leva a uma secagem e um endurecimento demasiado rápidos das argamassas.



Figura 4.1 Amostra de A^{Eps} em estado fresco.

A figura 4.2 mostra a relação água/argamassa industrial para as duas argamassas industriais com o aumento da percentagem de aerogel na amostra.

Verifica-se que para grandes quantidades de aerogel, há a necessidade de aumentar ligeiramente esta relação de modo a produzir-se uma argamassa de boa trabalhabilidade. Este facto pode levar a um aumento da massa volúmica aparente em estado fresco.

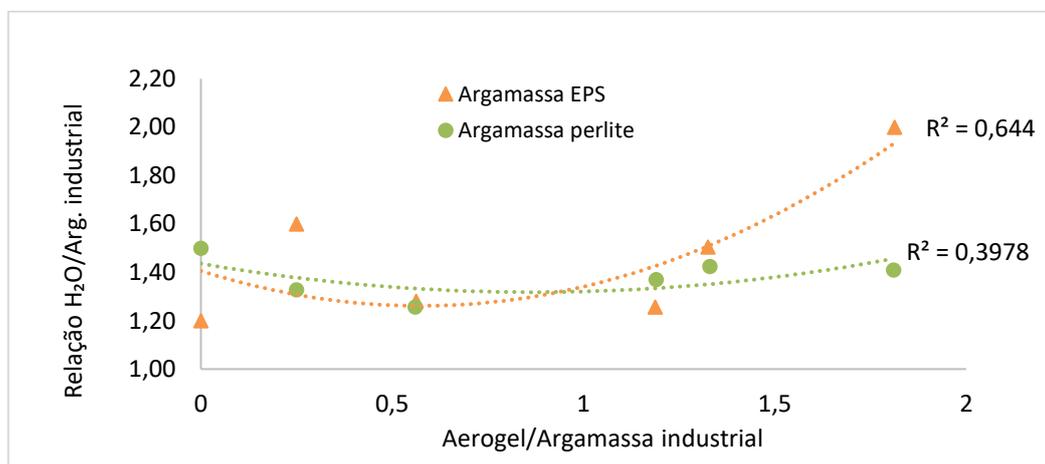


Figura 4.2 Variação da relação H₂O/Arg. industrial com o aumento da percentagem de aerogel na mistura.

Considerando a figura 4.2 pode-se observar uma tendência polinomial de 2º grau para ambas as argamassas industriais, com uma ligeira subida para Aerogel/Argamassa industrial superior a 1,0. Esta constatação pode justificar o facto de algumas argamassas (nomeadamente A¹³³, A¹⁸¹, S¹³³ e S¹⁸¹) terem obtido valores de massa volúmica aparente ligeiramente superiores à tendência definida, admitindo que a densidade da água passa a ter uma representatividade superior à densidade das cargas leves e da estrutura porosa potencialmente formada.

4.2.2 Massa volúmica aparente da argamassa em pasta

O ensaio da massa volúmica aparente em pasta realizou-se para as 14 argamassas industriais em estudo e os resultados obtidos estão expressos na tabela 4.1 e 4.2, em que na primeira coluna pode-se observar a relação Aerogel/Argamassa industrial, independentemente de esta ser argamassa industrial A^{EPS} ou A^{Perlite}. Uma relação de 1,0 (1:1) significa que a mistura apresenta 50% de aerogel e 50% da argamassa industrial relativamente à massa total. Quanto às designações utilizou-se “A” e “S” para as argamassas à base de A^{EPS} e A^{Perlite} respetivamente e o expoente simboliza a razão Aerogel/A^{Ind} em percentagem.

Em todos os ensaios realizados, estabeleceu-se uma análise comparativa das argamassas em relação à amostra de referência (0% de aerogel) e apresentou-se a variação em percentagem (“Δ [%]”). Por fim, é de referir, que se comparou também, para as mesmas quantidades de aerogel, as duas argamassas de base distinta, em que o resultado se apresenta

em percentagem na última coluna de cada tabela (“ δ [%]”), sendo que se compara sempre a A^{Perlite} em relação a A^{EPS} , isto é, se a percentagem for positiva significa que o valor referente a argamassa de base perlite é superior, se for negativa o valor é inferior.

Tabela 4.1 Resultados da massa volúmica aparente em estado fresco, primeira fase.

Aerogel/ A^{Ind}	Designação	ρ [kg/m ³]	Δ [%]	Designação	ρ [kg/m ³]	Δ [%]	δ [%]
0,00	A^0	378,25	0%	S^0	435,00	0%	15%
0,25	A^{25}	336,50	-11%	S^{25}	306,75	-29%	-9%
0,56	A^{56}	329,50	-13%	S^{56}	303,00	-30%	-8%
1,19	A^{119}	268,00	-29%	S^{119}	232,00	-47%	-13%
1,33	A^{133}	313,75	-17%	S^{133}	266,50	-39%	-15%
1,81	A^{181}	280,00	-26%	S^{181}	249,25	-43%	-11%

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; ρ – massa volúmica aparente; Δ – variação em relação à amostra de referência; δ – relação entre as argamassas industriais A^{EPS} e A^{Perlite} para cada percentagem diferente de aerogel.

Na tabela 4.1 pode observar-se que os valores para a massa volúmica estão compreendidos entre cerca de 280-378 kg/m³ para as argamassas A^{EPS} e entre 249-435 kg/m³ para as de A^{Perlite} . Note-se que o valor da amostra de referência da A^{EPS} , 378,25 kg/m³, encontra-se dentro do intervalo fornecido pelo fabricante, intervalo este que se pode consultar na ficha técnica do material e é de 350±75 kg/m³ [W17]. Em relação à argamassa de referência (0% de aerogel) da A^{Perlite} não existe valor tabelado, visto ser uma argamassa atualmente em desenvolvimento.

Ao analisar a tabela 4.1, comparando as argamassas de aerogel com as de referência, constata-se, que a adição de aerogel resulta numa diminuição da massa volúmica aparente nas argamassas de base A^{EPS} em 26% e um decréscimo para as de A^{Perlite} de 43%. Apesar da amostra de referência de A^{Perlite} apresentar um valor superior à de A^{EPS} , observa-se a inversão da tendência para percentagens superiores de aerogel, onde se obteve valores inferiores para a A^{Perlite} , em cerca de 10%.

Os resultados relativos à segunda produção, para a massa volúmica aparente em estado fresco, são equivalentes à tabela 4.1 e por essa razão não se encontram indicados. Relativamente à terceira produção, por se ter produzido argamassas não definidas na primeira produção (A^{100} e S^{100}), os resultados encontram-se indicados na tabela 4.2. Pode-se acrescentar ainda que estas argamassas não devem ser comparadas diretamente com as primeiras, visto que as quantidades de água adicionada a cada argamassa são distintas. Para a análise da tendência desta propriedade apenas se consideraram os resultados da primeira produção.

Tabela 4.2 Resultados da massa volúmica aparente em estado fresco, terceira fase.

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	ρ [kg/m ³]	Δ [%]	Designação	ρ [kg/m ³]	Δ [%]	δ [%]
1,00	A ¹⁰⁰	323,50	-14%	S ¹⁰⁰	262,75	-40%	-19%
1,33	A ¹³³	329,25	-13%	S ¹³³	247,25	-43%	-25%

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; ρ – massa volúmica aparente; Δ – variação em relação à amostra de referência; δ – relação entre as argamassas industriais A^{EPS} e A^{Perlite} para cada percentagem diferente de aerogel.

Pode observar-se na figura 4.3, uma variação da massa volúmica aparente com o aumento de aerogel para as duas argamassas industriais em estudo e a tracejado a sua tendência geral.

A partir dos dados obtidos pode-se, de um modo geral, verificar que a massa volúmica aparente diminui com o aumento da percentagem de aerogel na mistura.

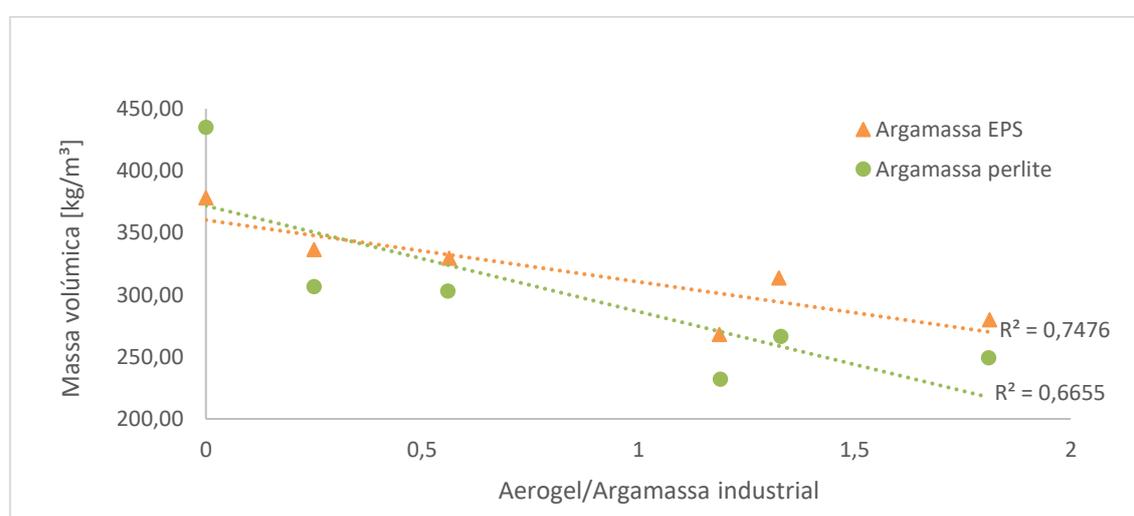


Figura 4.3 Variação da massa volúmica aparente em pasta com a adição de aerogel na mistura.

Considera-se que há uma descida contínua ao longo de todas as amostras, de carácter linear, e que as argamassas A¹¹⁹ e S¹¹⁹ representam valores ligeiramente inferiores à tendência ilustrada. A discrepância das amostras mencionadas, pode justificar-se com o facto de a quantidade de água adicionada se definir consoante a trabalhabilidade da própria argamassa. Por essa razão e por a trabalhabilidade ser uma característica empírica, resulta uma possível variação à tendência obtida. Isto é, a relação água/arg.ind. da argamassa pode ter impacto direto na massa volúmica aparente. Neste tipo de argamassas, pode existir um erro associado de ± 75 kg/m³ [W17], que quando considerado se obtém valores mais aproximados à tendência definida.

Pode-se verificar ainda que ambas as argamassas têm a mesma variação, ou seja, têm um andamento praticamente paralelo, exceto a amostra de referência, o que sugere que a introdução de aerogel tem um impacto importante na estrutura formada e na relação com as cargas leves restantes e/ou a relação de ligante presente.

4.3 Caracterização das argamassas em estado endurecido

4.3.1 Massa volúmica aparente da argamassa endurecida

No presente capítulo analisam-se os resultados obtidos da massa volúmica aparente para as amostras no estado endurecido. Ensaíram-se as amostras ao fim de 28 dias na câmara de cura seca e ao 31º dia, após a secagem das mesmas durante um período aproximado de 3 dias. Este período determina-se tendo como critério de paragem a obtenção de massa volúmica constante em duas medições consecutivas, isto é, a amostra apresenta-se totalmente seca.

Foram obtidos resultados referentes a três fases distintas. Numa 1ª fase, para as amostras destinadas ao ensaio com a sonda de contacto, posteriormente, numa 2ª fase, para as amostras destinadas aos ensaios com a sonda de agulha e numa 3ª fase para amostras com vista aos ensaios através do método *HFM* e sonda de agulha novamente. Os resultados apresentados nas tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 são referentes à média dos ensaios efetuados.

Tabela 4.3 Resultados da massa volúmica aparente no estado endurecido na 1ª fase.

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	ρ [kg/m ³]	Δ [%]	Designação	ρ [kg/m ³]	Δ [%]	δ [%]
0,00	A ⁰	234,75	0%	S ⁰	202,92	0%	-14%
0,25	A ²⁵	195,41	-17%	S ²⁵	158,27	-22%	-19%
0,56	A ⁵⁶	186,56	-21%	S ⁵⁶	175,95	-13%	-6%
1,19	A ¹¹⁹	137,05	-42%	S ¹¹⁹	129,98	-36%	-5%
1,33	A ¹³³	159,15	-32%	S ¹³³	149,87	-26%	-6%
1,81	A ¹⁸¹	127,32	-46%	S ¹⁸¹	141,03	-31%	11%

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; ρ – massa volúmica aparente; Δ – variação em relação à amostra de referência; δ – relação entre as argamassas industriais A^{EPS} e A^{Perlite} para cada percentagem diferente de aerogel.

Tabela 4.4 Resultados da massa volúmica aparente no estado endurecido na 2ª fase.

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	ρ^* [kg/m ³]	Δ [%]	Designação	ρ^* [kg/m ³]	Δ [%]	δ [%]
1,19	A ¹¹⁹	132,93	-43%	S ¹¹⁹	116,48	-43%	-12%
1,33	A ¹³³	143,47	-39%	S ¹³³	-	-	-
1,81	A ¹⁸¹	105,45	-55%	S ¹⁸¹	114,56	-44%	9%

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; ρ^* – massa volúmica aparente (*valores obtidos a partir de volumes aproximados de moldes de formato tronco cónico); Δ – variação em relação à amostra de referência; δ – relação entre as argamassas industriais A^{EPS} e A^{Perlite} para cada percentagem diferente de aerogel.

Tabela 4.5 Resultados da massa volúmica aparente no estado endurecido na 3ª fase.

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	ρ [kg/m ³]	Δ [%]
1,00	A ¹⁰⁰	102,62	-56%
1,33	A ¹³³	103,80	-56%

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; ρ – massa volúmica aparente; Δ – variação em relação à amostra de referência.

Analisando os dados obtidos pode-se observar que, relativamente às argamassas A^{Eps} os valores estão compreendidos entre 127-235 kg/m³, com uma redução associada a 45% do valor de referência, enquanto que, nas argamassas $A^{Perlite}$ se alcançaram variações ligeiramente inferiores, cerca de 30%, para valores de 141-203 kg/m³. Contrariamente ao que se constatou com as amostras em estado fresco, quando comparados os valores de maior percentagem de aerogel com os de referência, a argamassa à base de A^{Eps} obteve melhores resultados, isto é, uma menor massa volúmica aparente, sendo esta melhoria traduzida numa diferença de 10%. No entanto, de um modo geral, e tendo em consideração todas as argamassas e não só a de maior percentagem de aerogel verificou-se que as $A^{Perlite}$ apresentam valores inferiores às A^{Eps} .

Como discussão destes resultados, pode-se comparar a medição da amostra de referência, de aproximadamente 235 kg/m³, com o valor determinado pelo fabricante na ficha técnica do produto, 150±50 kg/m³ [W17], e verifica-se que se encontra ligeiramente fora dos valores aceitáveis. Este ligeiro desvio pode estar relacionado com uma sensibilidade aos processos de mistura (como por exemplo: o tempo de mistura).

Note-se que os resultados da tabela 4.4 são referentes a seis argamassas semelhantes às indicadas na tabela 4.3 (A^{119} , A^{133} , A^{181} e S^{119} , S^{133} , S^{181}) e que a discrepância entre os valores indicados pode-se dever a um cálculo aproximado do volume dos provetes utilizados, visto que os moldes não apresentam um formato regular (tronco cónico). Por este motivo considerou-se como mais relevantes os da 1ª fase, servindo os segundos como confirmação dos resultados atingidos, dado que se verifica aproximadamente a mesma gama de valores. Relativamente à tabela 4.5 os valores revelaram-se ligeiramente inferiores ao esperado, podendo dever-se ao facto de o furo no centro da amostra constituir um volume de ar e conseqüentemente reduzir a massa volúmica. As amostras de base $A^{Perlite}$ não se ensaiaram, pois fraturaram-se durante o desmolde.

Na figura 4.4 observa-se uma clara tendência da diminuição da massa volúmica aparente no estado endurecido, com o aumento da percentagem de aerogel. Apesar de ambas as argamassas apresentarem uma diminuição do valor da propriedade é de assinalar que A^{Eps} manifesta uma variação mais acentuada com a adição de aerogel (aprox. 50%) do que a $A^{Perlite}$ (aprox. 30%). Note-se que, tanto em estado fresco como em estado endurecido, podem-se verificar ligeiros desvios da tendência indicada. Todavia, no estado endurecido, esta diferença pode justificar-se com o facto de a medição dos volumes apresentar alguma imprecisão e no momento do desmolde algumas amostras terem perdido parte da sua massa, devido à sua fraca resistência mecânica.

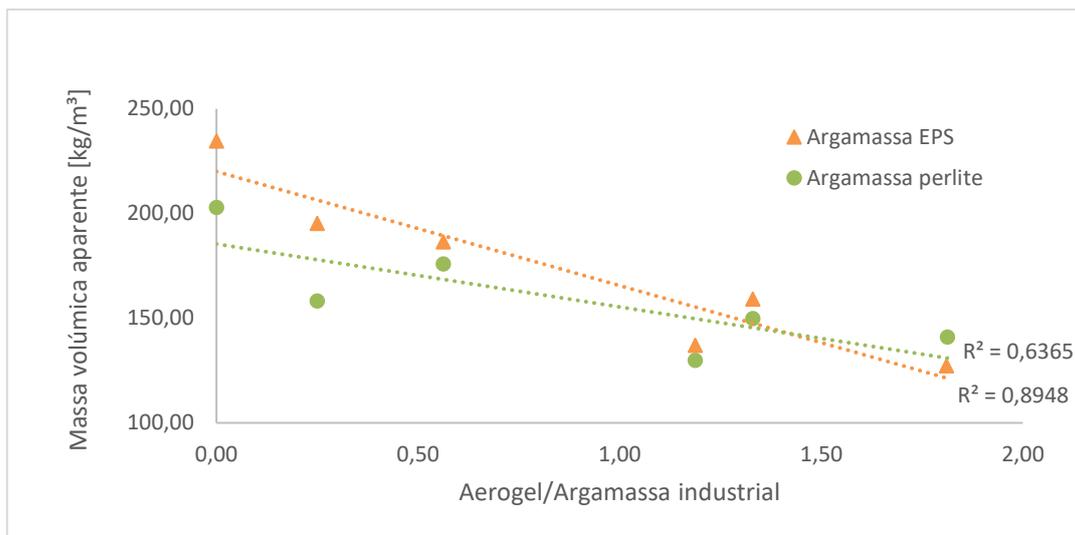


Figura 4.4 Variação da massa volúmica aparente em estado endurecido com o aumento da percentagem de aerogel na mistura.

Após a caracterização da massa volúmica aparente em estado endurecido húmido, as amostras foram sujeitas a uma secagem, de modo a retirar a humidade existente no interior dos poros e os resultados são os indicados na tabela 4.6.

Tabela 4.6 Resultados da massa volúmica aparente no estado endurecido seco na 1ª fase.

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	ρ [kg/m ³]	Δ [%]	Designação	ρ [kg/m ³]	Δ [%]	δ [%]
0,00	A ⁰	226,80	0%	S ⁰	200,71	0%	-12%
0,25	A ²⁵	181,70	-20%	S ²⁵	153,85	-23%	-15%
0,56	A ⁵⁶	172,86	-24%	S ⁵⁶	180,38	-10%	4%
1,19	A ¹¹⁹	124,23	-45%	S ¹¹⁹	123,79	-38%	0%
1,33	A ¹³³	154,73	-32%	S ¹³³	148,99	-26%	-4%
1,81	A ¹⁸¹	123,35	-46%	S ¹⁸¹	137,49	-31%	11%

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; ρ – massa volúmica aparente; Δ – variação em relação à amostra de referência; δ – relação entre as argamassas industriais A^{EPS} e A^{Perlite} para cada percentagem diferente de aerogel.

Esta secagem conduziu a uma diminuição, ainda que ligeira, da massa volúmica aparente da maioria das amostras, mantendo-se válidos os comentários estabelecidos relativamente às amostras em estado endurecido húmido, nomeadamente a variação relativa à amostra de referência a manter-se na ordem dos 45% e 30%, para A^{EPS} e A^{Perlite} respetivamente. Comparando as duas argamassas industriais para a amostra de referência a argamassa de A^{Perlite} revela uma massa volúmica aparente inferior, no entanto para valores de 181% de adição de aerogel verifica-se o contrário, valores superiores em aproximadamente 11%. A tendência geral permanece inalterada e tal facto pode ser observado na figura 4.5.

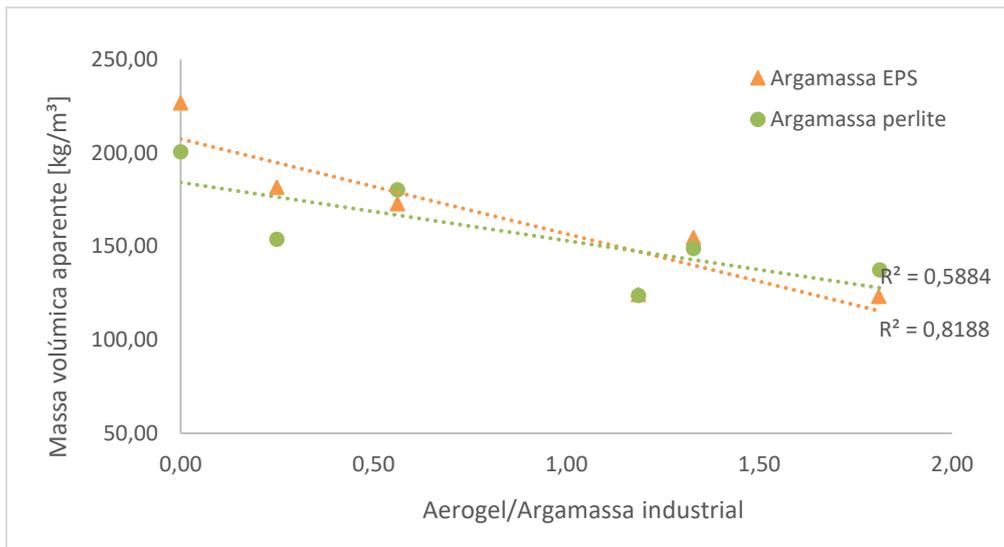


Figura 4.5 Variação da massa volúmica aparente em estado endurecido seco das amostras secas com o aumento da percentagem de aerogel na mistura.

Nesta análise de resultados, pode-se ainda estabelecer uma comparação entre valores em estado fresco e endurecido, avaliando a diminuição dos mesmos a uma escala temporal. Assim sendo, resulta que com o endurecimento das amostras observa-se um decréscimo significativo, na ordem dos 40-55%, enquanto que com a secagem destas obteve-se uma alteração pouco significativa, a rondar os 1-3%.

Relativamente às argamassas produzidas, os melhores valores obtidos, 123,35 (105,45) kg/m³ para A^{EPS} e 137,49 (114,56) kg/m³ A^{Perlite}, revelam-se bastante razoáveis, quando comparados com os resultados obtidos por outros autores, mais concretamente, Archard *et al.* (2011) e Stahl *et al.* (2012), que alcançaram valores de cerca de 156 kg/m³ e 200 kg/m³, respetivamente, nas suas argamassas.

Os resultados, tanto da segunda produção, como da terceira não estão indicados no seguinte texto (consultar anexos), pois para a análise da variação da massa volúmica aparente, com o aumento da quantidade de aerogel, os valores da primeira produção revelam-se mais apropriados.

4.3.2 Ensaio à condutibilidade térmica das argamassas

Para a medição da condutibilidade térmica, utilizaram-se dois modelos do equipamento ISOMET, o 2114 e o 2104, com duas sondas distintas, a de contacto e a de agulha e um equipamento com vista ao método *HFM*. Como tal, foi necessário para cada sonda/equipamento a produção de diferentes provetes. Avaliou-se também as propriedades térmicas das argamassas em dois momentos, aos 28 dias e após a secagem das amostras.

Em qualquer um dos ensaios realizados, obteve-se uma condutibilidade térmica inferior a 0,1 W/m.K, isto é, todas as argamassas produzidas são de categoria T1, segundo a classificação da condutibilidade térmica para argamassas térmicas aos 28 dias, estipulada na norma EN 998-1 (CEN, 2010).

Os resultados obtidos para as amostras cilíndricas com vista ao ensaio com a sonda de contacto apresentam-se na tabela 4.7.

Tabela 4.7 Resultados da condutibilidade térmica no estado endurecido para a sonda de contacto.

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	λ [W/m.K]	Δ [%]	Designação	λ [W/m.K]	Δ [%]	δ [%]
0,00	A ⁰	0,0542	0%	S ⁰	0,0547	0%	1%
0,25	A ²⁵	0,0452	-17%	S ²⁵	0,0484	-12%	7%
0,56	A ⁵⁶	0,0430	-21%	S ⁵⁶	0,0465	-15%	8%
1,19	A ¹¹⁹	0,0375	-31%	S ¹¹⁹	0,0414	-24%	10%
1,33	A ¹³³	0,0428	-21%	S ¹³³	0,0416	-24%	-3%
1,81	A ¹⁸¹	0,0411	-24%	S ¹⁸¹	0,0411	-25%	0%

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; λ – coef. de condutibilidade térmica; Δ – variação em relação à amostra de referência; δ – relação entre as argamassas industriais A^{EPS} e A^{Perlite} para cada percentagem diferente de aerogel.

Os valores indicados são resultantes de medições efetuadas com a sonda de contacto, a qual tem uma gama de valores de 0,04 – 0,3 W/m.K, isto é, valores próximos de 0,04 podem não ser realistas. Por esta razão, para argamassas de maior percentagem de aerogel e de valores próximos ou inferiores à gama da sonda de contacto mediu-se novas amostras com a sonda de agulha, a qual apresenta uma gama coerente com os resultados esperados (0,015 – 0,05 W/m.K). Os valores da condutibilidade térmica para estas argamassas encontram-se expressos na tabela 4.8.

Tabela 4.8 Resultados da condutibilidade térmica no estado endurecido para a sonda de agulha.

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	λ [W/m.K]	Δ [%]	Designação	λ [W/m.K]	Δ [%]	δ [%]
1,19	A ¹¹⁹	0,0343	-37%	S ¹¹⁹	0,0307	-44%	-10%
1,33	A ¹³³	0,0346	-36%	S ¹³³	-	-	-
1,81	A ¹⁸¹	0,0288	-47%	S ¹⁸¹	0,0264	-52%	-8%

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; λ – coef. de condutibilidade térmica; Δ – variação em relação à amostra de referência; δ – relação entre as argamassas industriais A^{EPS} e A^{Perlite} para cada percentagem diferente de aerogel.

Por outro lado, por motivos não relacionados com o trabalho experimental (equipamento inoperacional), nem todas as medições com a sonda de contacto foram realizadas nas mesmas condições, tendo sido usados dois ISOMET de modelos distintos (2114 e 2104) e medidas algumas amostras aos 28 dias e outras aos 120 dias.

De modo a validar estes resultados mediram-se amostras nas duas condições e verificou-se que a diferença não é considerável, obtendo-se um erro associado a baixo dos 5% (tabela 4.9).

Tabela 4.9 Validação dos resultados obtido pela sonda de contacto.

Designação	28 dias (ISOMET 2114)	120 dias (ISOMET 2104)	δ [%]
A ⁰	0,0542	0,0548	1%
A ²⁵	0,0452	0,0475	5%
A ⁵⁶	0,0430	0,0454	5%

Legenda: δ – margem de erro entre as amostras medidas aos 28 dias e aos 120 dias.

Relativamente à sonda de agulha, por ser recém-adquirida, procedeu-se primeiramente a um ensaio a uma placa de EPS (figura 4.6), esperando obter-se o valor de condutibilidade térmica tabelada para o material respetivo (aproximadamente 0,035 W/m.K), o que se verificou.



Figura 4.6 Medição da condutibilidade térmica de uma placa de EPS

Considerando as medições efetuadas, observa-se que os valores das amostras de referência das A^{EPS} e A^{Perlite} são respetivamente 0,0542 W/m.K e 0,0547 W/m.K, valores bastante semelhantes. Com a adição de aerogel na mistura, nomeadamente com percentagens na ordem dos 180% de aerogel, atingiu-se valores significativamente baixos. Os valores de condutibilidade térmica correspondentes à percentagem de aerogel referida são 0,0288 W/m.K para as argamassas à base de EPS e 0,0264 W/m.K para as de base de agregado leve de perlite, o que significa uma descida de 47% e 52% relativamente às amostras de referência. Note-se ainda que para argamassas com quantidade de adição de aerogel igual ou inferior a 56% da massa da argamassa industrial em pó (A⁰, A²⁵, A⁵⁶, S⁰, S²⁵ e S⁵⁶), as argamassas de A^{EPS} apresentem melhores desempenhos térmicos que as A^{Perlite}. Para as amostras com maior quantidade de aerogel a tendência inverte-se, e as A^{Perlite} obtêm valores inferiores, alcançando-se uma diferença de 8%.

A secagem das amostras na estufa a 60°C (aproximadamente 3 dias na estufa), tendo como critério de tempo uma massa volúmica constante para duas medições consecutivas, permitiu uma perda de humidade, com influência direta na massa volúmica aparente dos provetes. Como consequência, dado estarem proporcionalmente relacionadas, também se verificou uma descida considerável no que diz respeito à condutibilidade térmica, descida essa que, em geral, se situa entre os 6-20%. Somente os provetes S^0 , S^{25} e S^{56} tem uma variação residual, variação essa que pode ser explicada, pelo facto de os provetes indicados terem sido testados aos 120 dias, isto é, maior tempo de cura.

Os resultados da condutibilidade térmica, para as amostras no estado endurecido seco, estão indicados nas tabelas 4.10 e 4.11.

Tabela 4.10 Resultados da condutibilidade térmica no estado endurecido seco para a sonda de contacto.

Aerogel/ A^{Ind}	Designação	λ [W/m.K]	Δ [%]	Designação	λ [W/m.K]	Δ [%]	δ [%]
0,00	A^0	0,0507	0%	S^0	0,0540	0%	6%
0,25	A^{25}	0,0425	-16%	S^{25}	0,0478	-11%	12%
0,56	A^{56}	0,0405	-20%	S^{56}	0,0460	-15%	14%
1,19	A^{119}	0,0361	-29%	S^{119}	0,0416	-23%	15%
1,33	A^{133}	0,0414	-18%	S^{133}	0,0415	-23%	0%
1,81	A^{181}	0,0405	-20%	S^{181}	0,0409	-24%	1%

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; λ – coef. de condutibilidade térmica; Δ – variação em relação à amostra de referência; δ – relação entre as argamassas industriais A^{EPS} e $A^{Perlite}$ para cada percentagem diferente de aerogel.

Tabela 4.11 Resultados da condutibilidade térmica no estado endurecido seco para a sonda de agulha.

Aerogel/ A^{Ind}	Designação	λ [W/m.K]	Δ [%]	Designação	λ [W/m.K]	Δ [%]	δ [%]
1,19	A^{119}	0,0272	-50%	S^{119}	0,0266	-51%	-2%
1,33	A^{133}	0,0274	-49%	S^{133}	-	-	-
1,81	A^{181}	0,0256	-53%	S^{181}	0,0226	-59%	-12%

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; λ – coef. de condutibilidade térmica; Δ – variação em relação à amostra de referência; δ – relação entre as argamassas industriais A^{EPS} e $A^{Perlite}$ para cada percentagem diferente de aerogel.

De modo a validar as medições efetuadas pela sonda de agulha, utilizou-se ainda outro método para a obtenção do coeficiente de condutibilidade térmica, o *HFM*. Ensaíram-se duas argamassas distintas, ambas de base A^{EPS} (as argamassas de base $A^{Perlite}$ não se ensaiaram, devido à sua rotura no momento da desmoldagem), pelos dois métodos e os resultados estão expressos na tabela 4.12. Note-se, que no caso do método *HFM* é necessária uma correção do valor da condutibilidade térmica, dado que este ensaio se efetuou a uma temperatura superior aos restantes, o que altera ligeiramente o resultado obtido. Estas correções são feitas com base nas equações 3.4 e 3.5 apresentadas no capítulo 3 em que o coeficiente de conversão (f_T) tem

valor 0.003, considerando-se o coeficiente definido para betões leves com condutibilidade térmica de 0,100 W/m.K (ISO/FDIS 10456, 2007). Resulta que em ambos os métodos os valores obtidos são bastante similares, podendo assim considerar-se os valores obtidos anteriormente, pelo método da sonda de agulha, aceitáveis.

Tabela 4.12 Comparação dos resultados da condutibilidade térmica pelo método da sonda de agulha e pelo HFM.

Aerogel/ A ^{EPS}	Desig.	λ - Sonda de agulha [W/m.K]	Δ [%]	λ - HFM [W/m.K]	λ - HFM (corrigido) [W/m.K]	Δ [%]
1,00	A ¹⁰⁰	0,0230	-55%	0,0235	0,0217	-57%
1,33	A ¹³³	0,0251	-53%	0,0239	0,0220	-57%

Legenda: λ – coef. de condutibilidade térmica; Δ – variação em relação à amostra de referência;

Após a apresentação dos resultados e a descrição das condições e validações dos ensaios efetuados, pretende-se realizar uma análise aos dados apresentados nas tabelas 4.10 e 4.11. Verifica-se que o valor da amostra de referência, A⁰ (0,0507 W/m.K), se aproximou do valor apresentado pelo fabricante na ficha técnica do produto, isto é de 0,0420 W/m.K. Contudo esta aproximação tem um erro associado de 17%, ainda assim superior ao previsto. Esta discrepância de valores pode relacionar-se com divergências no processo de produção relativamente ao fabricante, como o tempo de mistura e modo de compactação da argamassa. Em relação à S⁰ (0,0540 W/m.K) não existem dados de comparação, uma vez que é uma argamassa em estudo e sem ficha técnica definida.

Os valores mínimos alcançados para percentagens máximas de aerogel, verificaram-se ótimos, 0,0256 W/m.K para a A¹⁸¹ e 0,0226 W/m.K para a S¹⁸¹, comparando com valores usualmente obtidos em argamassas térmicas de elevado desempenho, o que demonstra um resultado favorável relativamente a este trabalho experimental. Os resultados obtidos aproximam-se de argamassas com incorporação de aerogel já comercializados em mercado suíço, como o *FIXIT 222* (FG, 2013), que apresenta uma condutibilidade térmica de 0,0280 W/m.K. Outros estudos, como Stahl *et al.* (2012) e Archard *et al.* (2011) referem valores na mesma ordem de grandeza, 0,025 W/m.K e 0,0268 W/m.K, para argamassas com aerogel na sua constituição. Para as argamassas de percentagem máxima de adição de aerogel, obteve-se uma redução relativamente às amostras de referência de 53% e 59%, para as argamassas de base A^{EPS} e A^{Perlite} respetivamente.

Note-se ainda, que argamassas com uma relação Aerogel/Argamassa industrial superior a 1,0, isto é, uma mistura de 50/50, atingem valores de condutibilidade térmica inferiores a 0,035 W/m.K para ambas as argamassas industriais. E que existe uma relação direta entre a adição de aerogel e a diminuição da condutibilidade térmica da argamassa, quanto maior a quantidade de aerogel, menor a condutibilidade. Tais factos podem ser constatados na figura 4.7, onde se

encontra representa a tendência dos valores de condutibilidade térmica, com a adição de aerogel à mistura.

Porém, os resultados não permitem aferir a causa principal para a melhoria térmica obtida. Com efeito, pode ser devido ao impacto na redução da massa volúmica, pode ser devida à introdução de um material mais isolante por si ou pode ser por ambas as causas. Na correlação entre propriedades, em secção posterior, discute-se este aspeto.

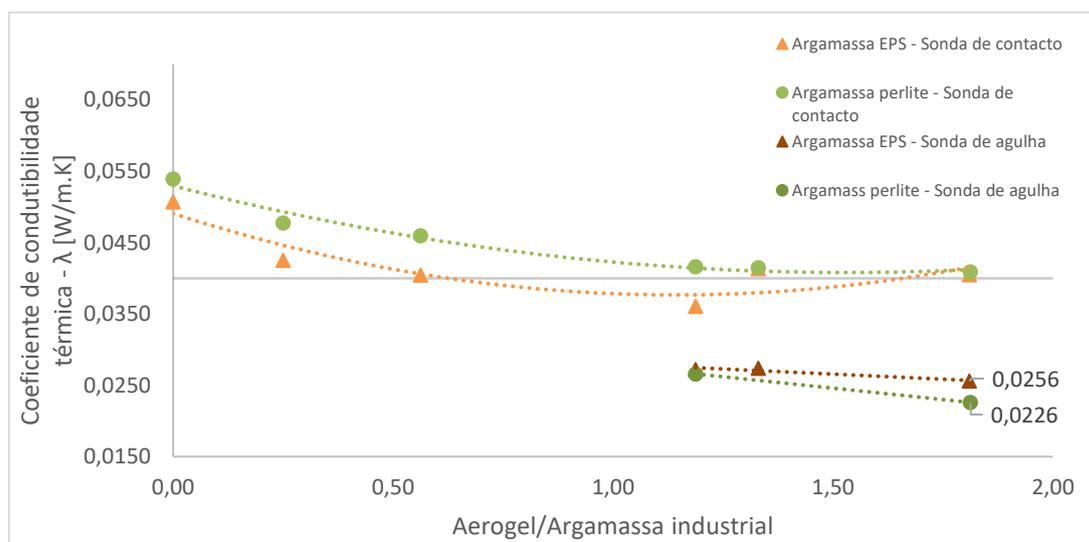


Figura 4.7 Variação da condutibilidade térmica com o aumento da percentagem de aerogel no estado endurecido seco.

Relativamente às amostras ensaiadas com a sonda de contacto, verifica-se uma tendência decrescente da condutibilidade térmica, com o aumento da percentagem de aerogel nas argamassas, aproximando-se do limite inferior da sonda, assinalado por uma linha horizontal em 0,04 W/m.K. Todos os valores em torno deste limite, nomeadamente as últimas três amostras de cada argamassa industrial, consideram-se desprezáveis e em sua substituição indicam-se os valores obtidos pela sonda de agulha.

De um modo geral, observou-se uma tendência decrescente, chegando a atingir uma redução de 53% e 59% do valor de referência, para a A^{Eps} e $A^{Perlite}$ respetivamente. Note-se que, apesar de nas primeiras amostras a A^{Eps} ter melhores resultados, para quantidades de aerogel mais elevadas as argamassas de $A^{Perlite}$ chegam a atingir menos 12% quando comparada com as argamassas de A^{Eps} .

4.3.3 Ensaio à resistência à compressão da argamassa endurecida

A determinação da resistência à compressão das argamassas em estudo foi realizada aos 28 dias. Realizou-se esta análise com o objetivo de quantificar a variação da resistência com

o aumento de aerogel na mistura. A resistência à compressão para cada uma das argamassas térmicas está expressa em MPa na tabela 4.13.

Tabela 4.13 Resultados dos ensaios da resistência à compressão.

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	f_c [MPa]	Δ [%]	Designação	f_c [MPa]	Δ [%]	δ [%]
0,00	A ⁰	0,31	0%	S ⁰	0,09	0%	-69%
0,25	A ²⁵	0,20	-35%	S ²⁵	0,09	0%	-53%
0,56	A ⁵⁶	0,12	-61%	S ⁵⁶	0,06	-40%	-53%
1,19	A ¹¹⁹	0,05	-84%	S ¹¹⁹	0,01	-87%	-75%
1,33	A ¹³³	0,09	-69%	S ¹³³	0,03	-67%	-67%
1,81	A ¹⁸¹	0,05	-84%	S ¹⁸¹	0,04	-60%	-25%

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; f_c – resistência à compressão; Δ – variação em relação à amostra de referência; δ – relação entre as argamassas industriais A^{EPS} e A^{Perlite} para cada percentagem diferente de aerogel.

Segundo a Norma EN 998-1 (CEN, 2010) existem quatro classes referentes à resistência à compressão de argamassas aos 28 dias, em que a classe mínima é a CS I e compreende valores entre 0,4 e 2,5 MPa. Assim sendo, em qualquer um dos ensaios realizados, obteve-se uma resistência inferior a 0,4 MPa, em princípio de importância relativa, uma vez que um sistema que incorpore qualquer uma destas argamassas térmicas será sempre preparado de modo a proteger a camada isolante. Essa proteção pode ser constituída por duas camadas de argamassa não térmica incorporando uma malha de fibra de vidro no seu interior, que confere uma proteção à argamassa térmica relativamente a ações de impacto (capítulo 2). Por outro lado, de modo a ter em conta as baixas resistências das argamassas térmicas de elevado desempenho, admite-se desenvolvimento de nova regulamentação que permita enquadrar estas mesmas argamassas e que as classifica para valores entre 0,01 MPa e 0,2 MPa (Fpr EN 16025-1, CEN 2012).

Analisando os resultados indicados na tabela 4.13, verifica-se que o valor de referência, A⁰ (0,31 MPa), se encontra ligeiramente abaixo do limite indicado na ficha técnica do material. Note-se que quando comparadas para as amostras de referência, a A^{EPS} tem logo à partida uma resistência à compressão muito superior à A^{Perlite}, na ordem dos 70%.

Como seria expectável, em ambas as argamassas industriais, houve uma redução da resistência mecânica com o aumento da percentagem do aerogel, chegando, no caso das A^{EPS}, a atingir diferenças de 84% em relação às amostras de referência e das A^{Perlite} de 75%. As percentagens referidas são alusivas a resistências bastante reduzidas, que se situam na ordem dos 0,01-0,05 MPa e não se devem confrontar diretamente, pois como referido, as A^{Perlite} tem valores iniciais inferiores.

A partir dos resultados, pode-se observar que é necessária uma relação de aproximadamente 1:1 de aerogel e A^{EPS} para se obter os valores de resistência da amostra de referência S^0 . Isto é, quando adicionado aerogel em quantidades a rondar os 50% da massa da argamassa industrial EPS, é que se verificam valores de resistência semelhantes aos obtidos na argamassa S^0 , o que mostra a fraca resistência das argamassas de base perlite relativamente às de EPS.

Com base no facto das argamassas de perlite apresentarem valores bastante baixos de resistência mecânica e na dificuldade de produção de provetes com base de $A^{Perlite}$, conclui-se que para estas argamassas, que com a adição de aerogel na mistura, surge a necessidade de um aumento da quantidade de materiais de propriedades aglutinantes, como o cimento ou a cal hidráulica, em detrimento de outros componentes, de modo a conferir uma maior resistência mecânica. Como tal, de forma a tornar possível a adição de materiais como o cimento ou a cal, sem provocar um aumento acentuado ao nível da condutibilidade térmica e massa volúmica aparente da argamassa, pode-se adicionar o material aglutinante em detrimento de agregados pesados ainda presentes na argamassa industrial, como areia, ou ainda retirar agregados leves. No entanto, no segundo caso existe a necessidade de adição de uma quantidade de aerogel extra, além do cimento, para manter os valores de condutibilidade térmica referente às percentagens de aerogel inicial.

É de referir ainda que, apesar de para $A^{Perlite}$ a adição de aerogel e o consequente aumento de área superficial dos agregados leves solicite um aumento de materiais aglutinantes, revelando-se a quantidade existente insuficiente, as A^{EPS} acabam por evidenciar alguma consistência para iguais percentagens de aerogel. Esta diferença é notória quando da análise do gráfico na figura 4.8.

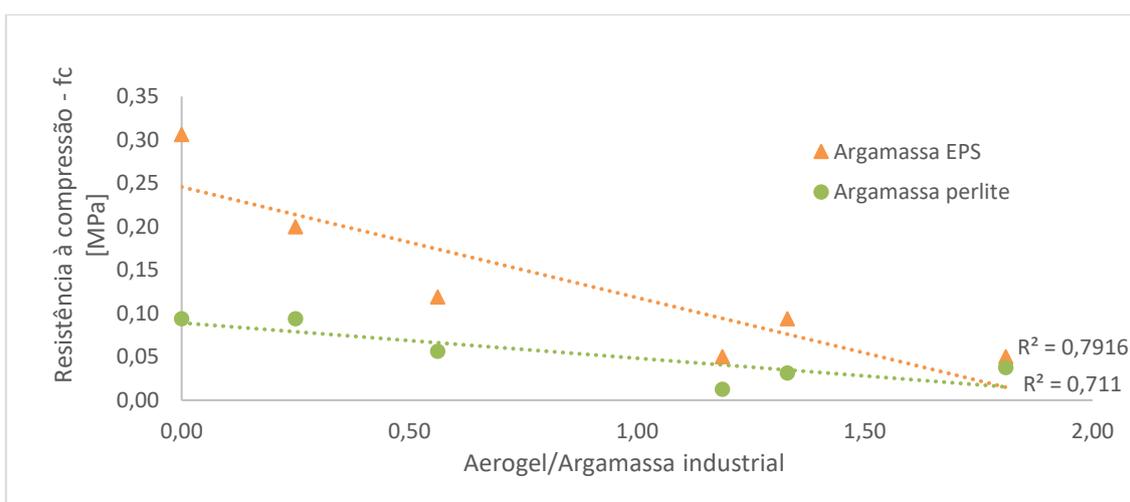


Figura 4.8 Variação da resistência à compressão com o aumento da percentagem de aerogel.

Como se pode deduzir da tendência do gráfico, no caso de argamassas de base EPS, para percentagens de adição de aerogel superiores a 140% da massa da argamassa industrial, a resistência à compressão torna-se inviável, atingindo valores inferiores a 0,1 MPa. Assim sendo é de evitar a produção de argamassas para esta gama de valores.

4.3.4 Módulo de elasticidade dinâmico e de torção

Nas tabelas 4.14 e 4.15 encontram-se representados os valores médios dos resultados obtidos para o módulo de elasticidade dinâmico (E) e de torção (G) das argamassas industriais em análise. Os ensaios realizaram-se 28 dias e determinaram-se os resultados através do *software GENEMOD*. Note-se que as amostras relativas a S²⁵ fraturaram-se e por esse motivo não se encontram indicados os resultados na tabela 4.14.

Tabela 4.14 Valores do módulo de elasticidade dinâmico e de torção para as argamassas A^{Eps}.

Aerogel/A ^{Eps}	Designação	G [MPa]	Δ [%]	E [MPa]	Δ [%]
0,00	A ⁰	59,8	0%	144,9	0%
0,25	A ²⁵	20,8	-65%	44,6	-69%
0,56	A ⁵⁶	11,1	-81%	23,5	-84%
1,19	A ¹¹⁹	4,2	-93%	3,9	-97%
1,33	A ¹³³	2,0	-97%	7,0	-95%
1,81	A ¹⁸¹	1,4	-98%	4,2	-97%

Legenda: A^{Eps} – argamassa industrial em pó com EPS como agregado leve maioritário; E – Módulo de elasticidade dinâmico; G – Módulo de torção; Δ – variação em relação à amostra de referência.

Tabela 4.15 Valores do módulo de elasticidade dinâmico e de torção para as argamassas A^{Perlite}.

Aerogel/A ^{Perlite}	Designação	G [MPa]	Δ [%]	E [MPa]	Δ [%]
0,00	S ⁰	12,6	0%	85,4	0%
0,25	S ²⁵	-	-	-	-
0,56	S ⁵⁶	2,0	-84%	6,0	-93%
1,19	S ¹¹⁹	10,7	-15%	51,3	-40%
1,33	S ¹³³	1,2	-90%	2,6	-97%
1,81	S ¹⁸¹	1,6	-87%	3,1	-96%

Legenda: A^{Perlite} – argamassa industrial em pó com perlite como agregado leve maioritário; E – Módulo de elasticidade dinâmico; G – Módulo de torção; Δ – variação em relação à amostra de referência;

Com a análise dos resultados constata-se que, relativamente ao módulo de elasticidade dinâmico (E) se obtiveram valores entre 4,2 e 144,9 MPa para as argamassas A^{Eps} e entre 3,1 e 85,4 MPa para as de A^{Perlite}. Quanto ao módulo de torção (G) os resultados situaram-se entre

1,4 e 59,8 MPa para as argamassas A^{Eps} e para as $A^{Perlite}$ os valores estão compreendidos em entre 1,6 e 12,6 MPa.

Sendo A^0 a única argamassa produzida neste trabalho experimental de propriedades conhecidas e estudadas anteriormente, o seu valor de módulo de elasticidade dinâmico pode ser comparado. Segundo o fabricante, em laboratório, obteve-se o valor de 100 MPa para a amostra de referência mencionada, apesar de não ser um valor declarado. Quando comparada com o resultado do ensaio, 144,9 MPa, pode-se afirmar que apesar de um desvio de cerca de 40%, ambos os valores se encontram na mesma ordem de grandeza.

Com base nos resultados indicados nas tabelas 4.14 e 4.15, pode observar-se na figura 4.9, um gráfico no qual se verifica uma tendência geral de diminuição dos valores de E e G, com a adição de aerogel, para cada argamassa industrial.

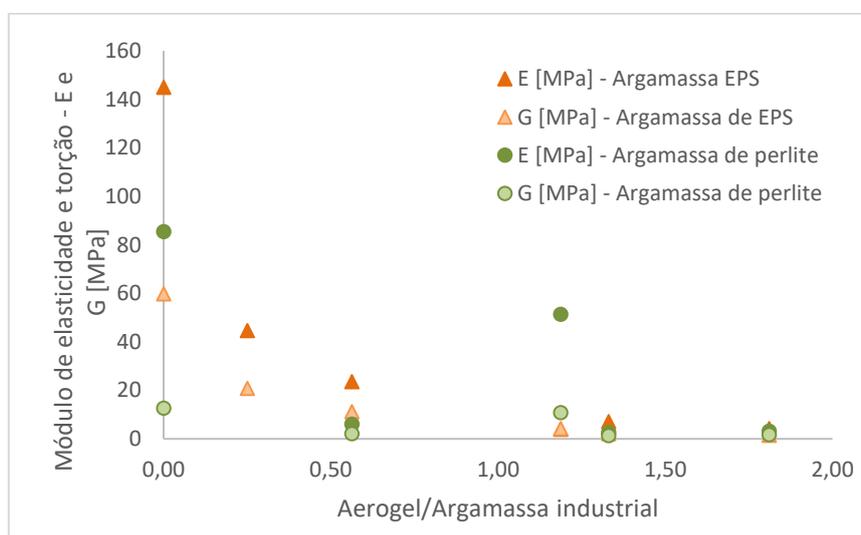


Figura 4.9 Variação do módulo de elasticidade dinâmico e de torção com o aumento da percentagem de aerogel nas argamassas A^{Eps} e $A^{Perlite}$.

Observa-se uma clara diminuição em ambas as propriedades, tanto para as argamassas de EPS como para as de perlite, tendendo para valores bastante reduzidos quando se atinge percentagens mais elevadas de aerogel. Com esta descida acentuada das características dos materiais, obteve-se valores na ordem dos 2-5 MPa, tanto para E como para G, isto é, diminuições de aproximadamente 90% quando comparados com os valores das argamassas de referência.

4.4 Correlações

Após a apresentação e o comentário dos resultados obtidos relativamente às propriedades analisadas individualmente nesta campanha experimental, torna-se necessário, de modo a

compreender a relação entre as mesmas, analisá-las através de gráficos onde seja explícita a sua correlação.

No que diz respeito à relação entre as massas volúmica aparente e a razão $H_2O/Argamassa$ industrial, pode-se afirmar que a água tem importância no que diz respeito à determinação da massa volúmica aparente, tanto em estado fresco como em estado endurecido seco. Por um lado, no estado fresco, tem uma influência negativa, dado que quanto maior a quantidade de água necessária, maior a massa volúmica aparente, uma vez que a água tem 1000 kg/m^3 a temperatura ambiente. Por outro lado, no estado endurecido seco, a água apresenta um efeito positivo, pois cria porosidade que após a secagem da argamassa, é preenchida por ar, resultando numa menor massa volúmica (Vieira *et al.*, 2015).

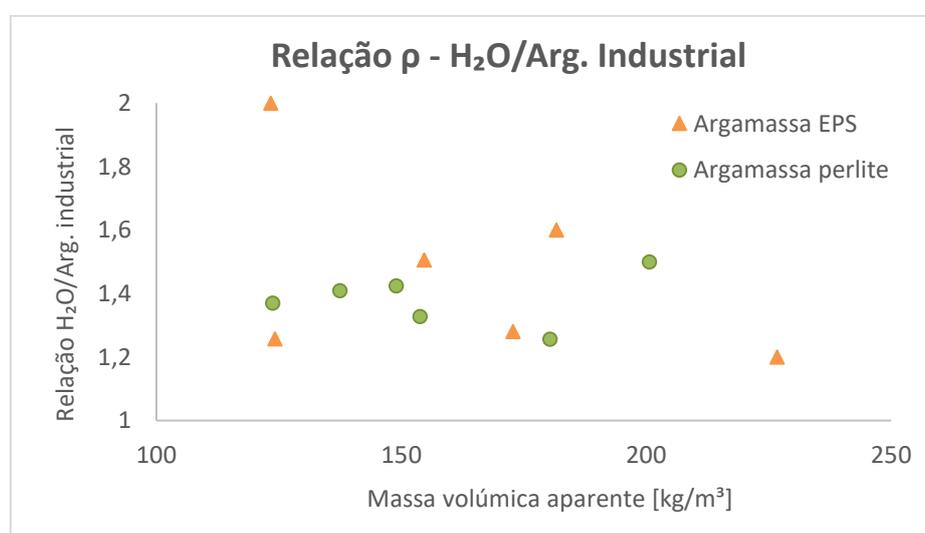


Figura 4.10 Correlação entre a massa volúmica aparente no estado endurecido e a relação $H_2O/Arg.$ industrial.

Na figura 4.10 observa-se que a massa volúmica e a razão $H_2O/Argamassa$ industrial não têm uma correlação definida, pois o R^2 apresenta valores inferiores a 0,5. Este facto pode ser explicado pela quantidade de água adicionada às argamassas depender em grande parte da trabalhabilidade apresentada pelas argamassas.

A relação entre a massa volúmica e a condutibilidade térmica está representada na figura 4.11. Pode-se observar uma tendência diretamente proporcional e aproximadamente linear para ambas as argamassas industriais. De um modo geral, quanto menor massa volúmica aparente, menor coeficiente de condutibilidade térmica apresentado pela argamassa. Este fenómeno verifica-se em grande parte das amostras, embora com algumas exceções. Algumas argamassas com o aumento da quantidade de aerogel na amostra, apresentam um ligeiro aumento da massa volúmica aparente. No entanto, apesar disso, apresentam igualmente uma diminuição contínua da condutibilidade térmica, nomeadamente, nas argamassas A^{133} , A^{181} e S^{181} (para a amostra S^{133} , apesar de não se ter obtido um valor relativo à condutibilidade térmica,

pode-se deduzir o mesmo comportamento que as referidas). O fenómeno verificado, deve-se ao facto de a massa volúmica aparente da argamassa ter um papel importante na determinação da condutibilidade térmica, mas não único, sendo que o outro fator relevante, são as características térmicas intrínsecas ao próprio aerogel, as quais influenciam bastante a condutibilidade térmica final da argamassa. A título de exemplo tem-se a amostra S¹⁸¹ com 137,5 kg/m³ e 0,0226 W/m.K, indicada na figura 4.11.

O fenómeno referido, de que as características térmicas do aerogel são um importante fator na obtenção de boas condutibilidades térmicas, pode-se fundamentar com as massas volúmicas dos materiais por si só, isto porque a massa volúmica do EPS é aproximadamente 20 kg/m³ [W16] e do aerogel 60-100 kg/m³ [W14] e, apesar disso, o aerogel demonstra uma maior capacidade de isolamento térmico que o EPS, sendo que a sua condutibilidade térmica é inferior.

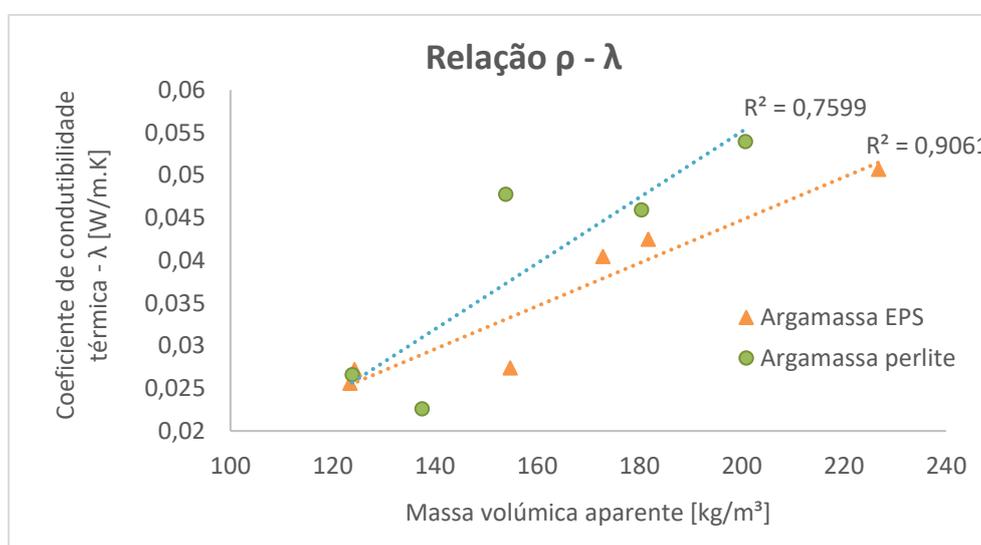


Figura 4.11 Correlação entre a massa volúmica aparente e a condutibilidade térmica.

Após referenciar uma diminuição de ambas as propriedades com o aumento de aerogel, importa ainda comparar a ordem de grandeza desse decréscimo em relação às amostras de referência. Para uma argamassa de 64% de aerogel na sua mistura (A¹⁸¹ e S¹⁸¹), no caso da A^{EPS}, obteve-se uma diminuição ao nível da massa volúmica aparente de 47% e da condutibilidade térmica de 53%. Nas mesmas condições, mas para uma argamassa de base A^{Perlite}, o decréscimo da massa volúmica verificou-se inferior, de aproximadamente 32%, e a condutibilidade térmica superior, de 59%.

No que diz respeito à relação entre a massa volúmica aparente e a resistência à compressão das argamassas, é relevante referir que apresentam uma correlação consistente e linear com a variação da percentagem de aerogel na mistura. Na figura 4.12 é possível verificar uma diminuição da resistência à compressão com o decréscimo da massa volúmica em ambas argamassas, tendo como aspeto distinto o facto de a A^{EPS} ter uma variação mais acentuada

relativamente a $A^{Perlite}$. Com fundamento no gráfico indicado, é possível observar claramente, que para valores semelhantes da massa volúmica aparente, se obtém, para as duas argamassas, valores de resistência mecânica bastante distintos, isto é, nas argamassas de base $A^{Perlite}$ encontram-se resultados muito inferiores comparativamente com as A^{EPS} .

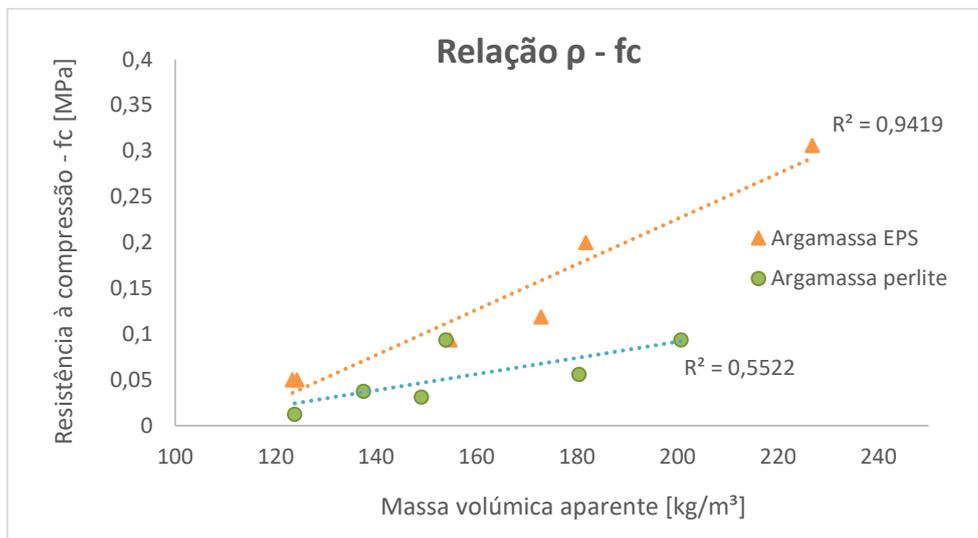


Figura 4.12 Correlação entre a massa volúmica aparente e a resistência à compressão.

Apesar de relativamente à condutibilidade térmica se obter uma melhoria de 59%, como referido, para as argamassas de $A^{Perlite}$, estas sofrem igualmente uma elevada redução em termos de resistência mecânica, uma vez que apresentam descidas de cerca de 60-80%, o que torna as argamassas de maior quantidade de aerogel inviáveis (argamassas com cerca de 140% de aerogel adicionado, relativamente à massa da argamassa industrial). Deste modo, em relação à correlação $\rho - f_c$, procede-se a uma análise comparativa para as amostras A^{133} e S^{133} . Ou seja, no caso da A^{133} , com a presença de 57% de aerogel na constituição da argamassa, há uma redução da massa volúmica aparente em 34% e uma conseqüente diminuição da resistência à compressão de 69%. A mesma tendência é admitida para a S^{133} com um decréscimo de 27% da massa volúmica aparente e de 67% da resistência à compressão.

Ainda no mesmo raciocínio, e para as mesmas argamassas referidas, obteve-se decréscimos dos valores de condutibilidade térmica na ordem dos 50%. Do mesmo modo que se relaciona a massa volúmica aparente e a resistência à compressão, pode-se relacionar a última com a condutibilidade térmica, observando que a sua correlação tem um comportamento dentro dos mesmos contornos, isto é, seguem uma relação linear e diretamente proporcional (figura 4.13).

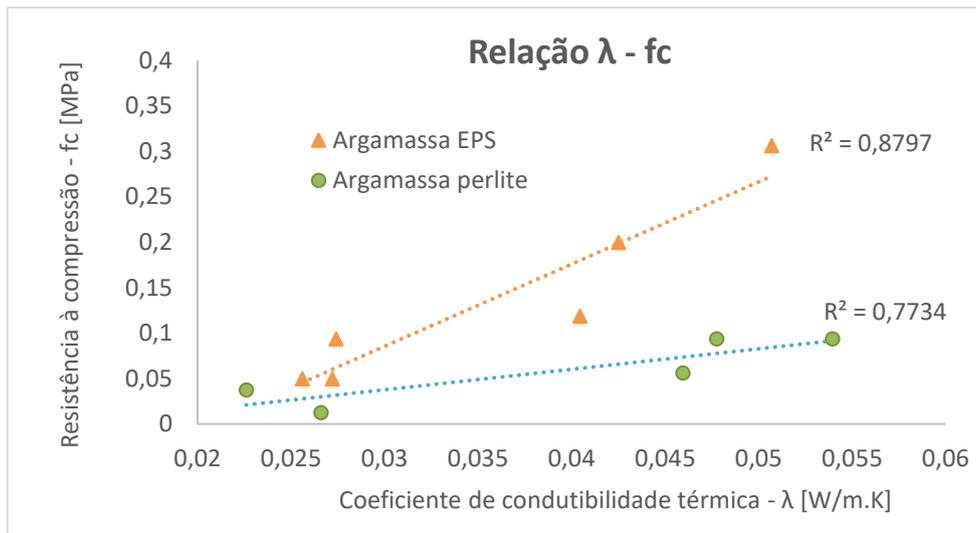


Figura 4.13 Correlação entre a condutibilidade térmica e a resistência à compressão.

Na figura 4.15 é apresentada uma relação entre a massa volúmica aparente e o módulo de elasticidade dinâmico, em que se pode observar uma correlação exponencial para a A^{EPS} , ou seja, quanto menor a massa volúmica aparente, menor o módulo de elasticidade dinâmico. O mesmo não se pode afirmar para as $A^{Perlite}$, cujo os resultados se encontram um pouco dispersos e não apresentam qualquer tendência.

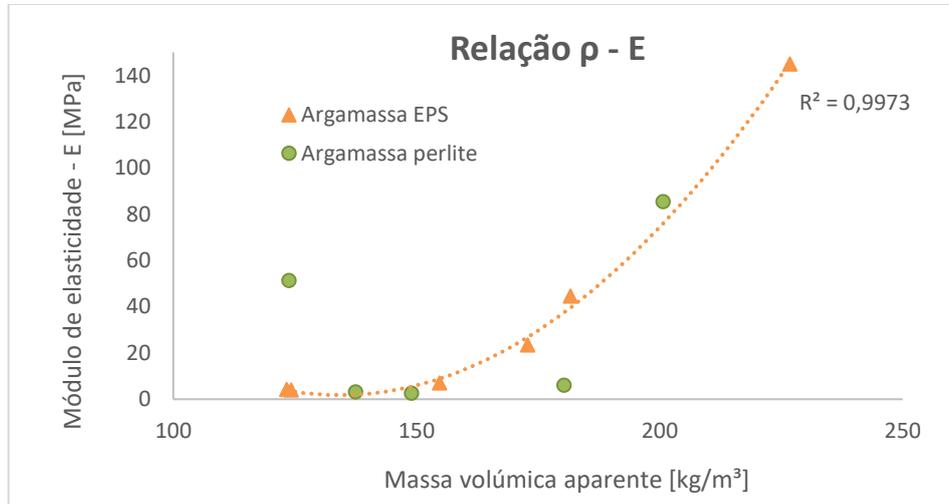


Figura 4.14 Correlação entre a massa volúmica aparente e o módulo de elasticidade.

Esta dispersão de valores pode dever-se ao facto de as condições e os métodos de ensaio dos provetes não se revelarem os mais adequados, isto é, verificou-se alguma dificuldade na obtenção das frequências que caracterizam o material. Por serem de uma elevada leveza, constatou-se alguma dificuldade na imobilização das amostras durante as pancadas, as quais determinam a frequência, e obtenção de um valor estável tornou-se difícil de adquirir.

4.5 Conclusões do capítulo

Com a adição de aerogel às argamassas industriais em estudo, verificou-se uma melhoria ao nível da condutibilidade térmica e um decréscimo no que diz respeito à massa volúmica aparente, à resistência à compressão e ao módulo de elasticidade dinâmico.

Devido ao facto de as argamassas com elevadas quantidades de aerogel (A^{133} , A^{181} , S^{133} e S^{181}) se tornarem inviáveis no que se refere à resistência à compressão (valores inferiores a 0,05 MPa), opta-se por tomar como valor de análise final a relação aerogel/argamassa industrial de 1,19. Isto é, uma argamassa que a cada 100 g de argamassa industrial em pó se adicionam 119 g de aerogel. Esta conclusão é particularmente importante para as argamassas com perlite que, quando apresentam resistências nesta ordem, são facilmente degradadas por simples toque com a mão.

Em suma, para argamassas de base A^{EPS} , com a adição de 119% de aerogel, ou seja, amostras com aproximadamente 54% de aerogel na sua constituição, obteve-se decréscimos de 47% relativamente à massa volúmica aparente e quanto à condutibilidade térmica diminuições de 50%. Do mesmo modo que a massa volúmica aparente e a condutibilidade térmica diminuem com o aumento da percentagem de aerogel, o mesmo ocorre com a resistência mecânica e o módulo de elasticidade dinâmico, onde as reduções são de 84% e 97% respetivamente.

Os resultados que suportam as percentagens referidas podem observa-se na tabela 4.16.

Tabela 4.16 Resultados obtidos para as argamassas A^{119} e S^{119} .

	ρ [kg/m ³]	λ [W/m.K]	f_c [MPa]	E [MPa]
A^{119}	124,23	0,0272	0,05	3,9
S^{119}	123,79	0,0266	0,01	51,3

Para as argamassas de base $A^{Perlite}$ a tendência geral é similar, embora, com diferentes percentagens. Para quantidades de aerogel semelhantes alcançou-se diminuições de 39% e 51%, no que se refere à massa volúmica aparente e condutibilidade térmica e ainda reduções ao nível da resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico em 87% e 40%. É de notar também que, mesmo para argamassas de percentagens reduzidas de aerogel, as argamassas de base perlite revelaram-se de muito baixa resistência mecânica, e que para se tornarem viáveis aquando da adição de aerogel é necessária a introdução de maiores quantidades de aglutinantes (cimento, cal ou resina).

5 Conclusões e desenvolvimentos futuros

5.1 Considerações iniciais

No âmbito desta dissertação realizou-se uma análise do comportamento de argamassas térmicas industriais com a adição de aerogel na sua constituição, com maior ênfase ao nível térmico. Ensaiou-se vários tipos argamassas de desempenho térmico melhorado, quanto à massa volúmica aparente, condutibilidade térmica, resistência à compressão e módulo de elasticidade dinâmico.

Com base nesses resultados, pode-se retirar algumas conclusões gerais relativamente ao comportamento das argamassas estudadas. Comenta-se ainda propostas de estudos que se poderão realizar no futuro, de modo a otimizar e melhorar todas as propriedades de relevo numa argamassa térmica.

5.2 Conclusões gerais

Como conclusão principal deste estudo, verifica-se que a adição de aerogel (no mínimo 25% da massa do produto em pó da argamassa industrial) em argamassas térmicas industriais, tem uma influência imediata no comportamento térmico e mecânico destas, diminuindo os valores de todas as propriedades estudadas. Como era expectável, o agregado leve de aerogel revelou-se um agregado bastante eficiente no que diz respeito à melhoria do desempenho térmico, contudo o mesmo não ocorreu relativamente à resistência à compressão, a qual sofreu uma diminuição considerável.

Tendo como ponto de partida as argamassas térmicas de referência (argamassas industriais A^{Eps} e $A^{Perlite}$ com 0% de aerogel), realizou-se uma análise comparativa com as argamassas compostas por agregados de aerogel, de onde se conclui que, para adições de aerogel (em massa) superiores a 100% da argamassa industrial, se obteve valores para a massa volúmica aparente no intervalo de 100-150 kg/m³, o que significa uma diminuição de cerca de 40-55% em relação às amostras de referência (227 e 201 kg/m³ para A^{Eps} e $A^{Perlite}$ respetivamente). Relativamente à condutibilidade térmica e para as mesmas argamassas (adições de aerogel superiores a 100%), obteve-se valores inferiores a 0,030 W/m.K, atingindo o mínimo de 0,023 W/m.K para a argamassa A^{100} , isto é, a mesma quantidade de argamassa industrial A^{Eps} e de aerogel. Esta adição de aerogel (superior a 100%) influenciou positivamente o desempenho térmico das argamassas, atingindo reduções na ordem dos 50 a 60%, quando comparado com as amostras de referência (0% de aerogel). É de notar que todas as argamassas produzidas são de classe térmica T1, de acordo com a norma EN 998-1 (CEN, 2010). No que diz respeito à resistência à compressão, novamente para adições de aerogel acima de 100%, houve decréscimos bastante consideráveis. Nas argamassas de base A^{Eps} obteve-se valores entre os 0,05-0,1 MPa, o que corresponde a uma redução de 70 a 85% e para argamassas de

base A^{Perlite} verificou-se igualmente uma redução, atingindo valores manifestamente inferiores à primeira, na ordem dos 0,01-0,05 MPa, com decréscimos de 60 a 80%. Devido às argamassas de base A^{Perlite} se revelarem de muito baixa resistência, deve-se considerar um incremento de material aglutinante aquando a adição de aerogel atinge percentagens elevadas. Em relação à classificação de acordo com a norma EN 998-1 (CEN, 2010), todas as argamassas possuem resistências inferiores à classe CSI, estando apenas em concordância com a pré-norma, Fpr EN 16025-1 (CEN, 2012). Foi ainda notória a diminuição do módulo de elasticidade dinâmico com o aumento de aerogel na mistura, alcançando reduções de cerca de 90%, ou seja, a incorporação de aerogel tornou as argamassas mais deformáveis.

De um modo geral, quando comparadas as duas argamassas industriais (A^{Eps} e A^{Perlite}), para as mesmas quantidades de aerogel adicionado, o seu comportamento é similar (em propriedades como a massa volúmica aparente, condutibilidade térmica e módulo de elasticidade dinâmico), com a exceção da resistência à compressão, em que as de base A^{Perlite} apresentam uma resistência inferior às de A^{Eps} .

Tendo como referência todos os ensaios efetuados e os resultados obtidos, e de modo a reduzir o mais possível a condutibilidade térmica, não diminuindo em demasia a resistência à compressão, conclui-se que das argamassas analisadas, a ideal estará próxima da A^{119} (talvez A^{100} , apesar de esta não se encontrar totalmente caracterizada), que apresenta uma massa volúmica aparente de 124 kg/m³, uma condutibilidade térmica de 0,0272 W/m.K, uma resistência à compressão de 0,05 MPa e um módulo de elasticidade dinâmico de 3,9 MPa.

5.3 Propostas de desenvolvimentos futuros

Nesta dissertação, produziram-se argamassas térmicas de desempenho melhorado e estudaram-se propriedades físicas associadas. No entanto, apesar da análise efetuada, outros estudos podem realizar-se, de modo a complementar a campanha experimental desenvolvida e a produzir argamassas de qualidade superior relativamente às suas propriedades térmicas e mecânicas.

Como se concluiu, na sequência do trabalho experimental realizado no âmbito desta dissertação, as argamassas industriais de agregado leve de perlite expandida (A^{Perlite}), com a adição de aerogel de sílica, revelaram-se de fraca resistência mecânica. De modo a melhorar a sua capacidade resistente, poderá testar-se a adição de diferentes quantidades de cimento ou resinas (material aglutinante) a uma argamassa térmica de relação aerogel/argamassa industrial constante (a título de exemplo considera-se a S^{119}). Pretende-se realizar ensaios à resistência à compressão, à massa volúmica aparente e à condutibilidade térmica e avaliar a influência da incorporação de maiores percentagens de material aglutinante na mistura. Procura-se avaliar de que modo compensa o aumento da resistência, tendo em conta o decréscimo do desempenho térmico da argamassa.

Ainda em relação à resistência à compressão, poderá utilizar-se diferentes tipos de metodologias, com base na pré-norma Fpr EN 16025-1 (CEN, 2012), para a determinação dos valores de resistência, dado que a metodologia utilizada é correntemente adotada para amostras de resistência superior. Da mesma forma outras metodologias poderão ser consideradas tanto na obtenção da condutibilidade térmica, como no módulo de elasticidade dinâmico.

Outro estudo que poderá ser realizado, desta feita aplicável em ambas as argamassas industriais, A^{Eps} e $A^{Perlite}$, é a análise da influência da granulometria e do tipo de aerogel introduzido na mistura (por exemplo secagem subcrítica). Para uma percentagem de aerogel constante, pretende-se produzir várias argamassas com diferentes granulometrias e analisar o impacto na condutibilidade térmica, bem como nas outras propriedades físicas importantes à caracterização de uma argamassa térmica. Desta forma procura-se homogeneizar a amostra e tirar o melhor partido da introdução do aerogel. Relativamente ao tipo de aerogel, pode-se produzir amostras com as mesmas percentagens de aerogel adicionado, mas de diferentes tipos (por exemplo de secagem subcrítica e supercrítica), verificando-se a influência desta discrepância.

Após a caracterização das argamassas térmicas, deve-se analisar a sua durabilidade ao longo do tempo.

Por fim, além dos agregados (EPS, perlite e aerogel), outras combinações de agregados isolantes poderão ser estudadas, com vista a uma argamassa térmica que apresente todos os requisitos necessários para a sua aplicação e uso em edifícios correntes.

Referências bibliográficas

Achard P.; Rigacci A.; Echantillac T.; Bellet A.; Aulagnier M.; Daubresse A. (2011) – “Enduit isolant à base de xerogel de silice”. WIPO Patent WO/083174, 2011.

Amaro B.; Saraiva D.; De Brito J.; Flores-Colen I. (2013) – “Inspection and diagnosis system of ETICS on walls”. *Construction and Building Materials*, Volume 47, October 2013, pp 1257-1267, Portugal.

APFAC (2015) – “Manual de aplicação – ETICS (*External Thermal Insulation Composite System*)”. APFAC, Portugal, 2015.

APFAC (2016) – “Isolamento de Paredes”. ADENE – Agência para a Energia. APFAC, Portugal, 2016.

Applied Precision Ltd – Datasheet ISOMET 2114 – “Portable system for measurement of heat transfer properties of materials”, Slovakia.

ASTM (2006) - “Standard test method for dynamic young’s modulus, shear modulus, and poisson’s ratio by impulse excitation of vibration”. ASTM E1876-01. American Society for Testing Materials, 2006.

ASTM (2010) – “Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus”. ASTM C518. American Society for Testing and Materials, 2010.

Barbero S.; Marco D.; Ferrua C.; Pereno A. (2014) – “Analysis on existent thermal insulating plasters towards innovative applications: evaluation methodology for a real cost-performance comparison”. *Energy and Buildings*, Volume 77, July 2014, pp 40-47, Italy.

Brás A.; Leal M.; Faria P. (2013) – “Cement-cork mortars for thermal bridges correction. Comparison with cement-EPS mortars performance”. *Construction and Building Materials*, Volume 49, December 2013, pp 315-327, Portugal.

CEN (1998) – “Methods of test for mortar for masonry – Part 6: Determination of bulk density of fresh”. EN 1015-6. Comité Européen de Normalisation, Brussels.

CEN (1999a) - “Methods of test for mortar for masonry - Part 10: Determination of dry bulk density of hardened mortar”. EN 1015-10. Comité Européen de Normalisation, Brussels.

CEN (1999b) - “Methods of test for mortar for masonry - Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar”. EN 1015-11. Comité Européen de Normalisation, Brussels.

CEN (2010) - "Specification for mortar for masonry - Part 1: Rendering and plastering mortar". EN 998-1. Comité Européen de Normalisation, Brussels.

CEN (2012) - "Thermal and/or sound insulating products in building construction - Bound EPS ballastings - Part 1: Requirements for factory premixed EPS dry plaster". FINAL DRAFT For EN 16025-1. Comité Européen de Normalisation, Brussels.

Corrêa D. (2016) – "Reabilitação Térmica de Fachadas de Edifícios Antigos". Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2016.

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

Cuce E.; Cuce P.M.; Wood C.J.; Riffat S.B. (2014) – "Optimizing insulation thickness and analyzing environmental impacts of aerogel-based thermal superinsulation in buildings". Energy and Buildings, Volume 77, July 2014, pp28-39.

Domone P.; ILLSTON J. (2010) – "Construction Materials – Their Nature and Behavior". Fourth Edition, 2010.

Duarte L. (2017) – Apresentação individual: "Argamassas de desempenho térmico melhorado". Secil Argamassas, CICCOPN, 25 de Janeiro 2017, Portugal.

Enerdata (2012) – "Energy efficiency trends in buildings in the EU". Lessons from the ODYSSEE MURE project, 2012, pp 11.

EUMEPS (2009) – "Sustainable Construction with EPS Insulation" - EUMEPS, Belgium, 2009.

EUMEPS (2014) – "Environmental Product Declaration - Expanded Polystyrene (EPS) Foam Insulation", Belgium, 2014

Faria P. (2012) – "Argamassas Sustentáveis" – 2ª Conferência Construção e Reabilitação Sustentável de Edifícios no Espaço Lusófono, Faculdade de Ciências e Tecnologias, Lisboa, 2012.

Faria P.; Silva V. (2012) – "Argamassas compatíveis com alvenarias históricas com base em cal hidráulica natural", - Conferência Internacional sobre Reabilitação de Estruturas Antigas de Alvenaria, Lisboa, 2012.

FIXIT GRUPPE (2013) – "Aerogel Insulating Plaster System: Handling Guidelines". Datasheet FIXIT 222, Switzerland, 2013.

Frade D.; Correia A. (2014) – “Argamassas Térmicas, uma solução na melhoria do Desempenho Térmico dos Edifícios”, TEKTÓNICA 2014, APFAC, Lisboa.

Frade D.; Gonçalves P.; Nascimento, S.; Sequeira A. (2010) – “Argamassa de Reboco com Características Térmicas”. Secil Martingança, S.A., Portugal, 2010.

Frade D.; Tadeu A.; Torres I.; Mendes P.; Simões N.; Matias G.; Neves A. (2012) - “Argamassas industriais com incorporação de granulado de cortiça”. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS, Coimbra, 2012.

Freitas V.; Gonçalves P. (2005) – “Reboco delgado armado sobre poliestireno expandido – ETICS”, FEUP, Formação contínua, Porto, 2005.

Gao T.; Jelle B.; Gustavsen A.; Jacobsen S. (2014) – “Aerogel-incorporated concrete: an experimental study”. Construction and Building Materials, Volume 52, February 2014, pp 130-136, Norway.

Garrido R. (2015) – “Avaliação económica do ciclo de vida de argamassas com desempenho térmico melhorado”. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2015.

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

Gonçalves P.; Frade D. (2012); Brites J. – “Argamassas térmicas: Uma solução no cumprimento do RCCTE”. 4º Congresso Português de Argamassas e ETICS. Secil Martingança, S.A., 30 de Março 2012, Portugal.

Grupo GRX (2014) – “Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos - Argamassa Térmica *Thermo-X*”. São Paulo, Brasil, 2014.

Huang L. (2012) - "Feasibility study of using silica aerogel as insulation for buildings". Dissertação de Mestrado, KTH School of Industrial Engineering and Management, Estocolmo, Suécia.

Ibrahim M.; Biwole P.H.; Achard P.; Wurtz E. (2015) – “Aerogel-Based Materials for Improving the Building Envelope’s Thermal Behavior: A Brief Review with a Focus on a New Aerogel-Based Rendering”. Green Energy and Technology, April 2015, pp 163-188.

IPQ (2006) – “Métodos de ensaio de cimentos – Parte 1: Determinação das resistências mecânicas”. NP EN 196-1:2006. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

IPQ (2011) – “Cal de construção - Parte 1: Definições, especificações e critérios de conformidade”. NP EN 459- 1:2011. Instituto Português da Qualidade, Lisboa.

ISO/FDIS 10456:2007 – “Building materials and products - Hygrothermal properties - Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values”. International Organization for Standardization (2007).

Júlio M.; Soares A.; Flores-Colen I., Ilharco L.; Morgado A.; De Brito J. (2015) – “Performance and characterization of nanoaerogel-based renders: Supercritical hybrid aerogel-based renders”, Relatório CERis – DTC nº 51/2015.

Júlio M.; Soares A.; Ilharco L.; Flores-Colen I.; Brito J. (2016) – “Aerogel-based renders with lightweight aggregates: Correlation between molecular/pore structure and performance”. Construction and Building Materials, Volume 124, 15 October 2016, pp 485-495.

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

Melo A. (2000) – “Caracterização de Betões Leves Vibrocomprimidos com Agregados de Argila Expandida”. Dissertação de Mestrado, Universidade do Porto, Porto, 2000.

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

Raki L.; Beaudoin J.; Alizadeh R.; Makar J.; Sato T. (2010) – “Cement and Concrete Nanoscience and Nanotechnology”. National Research Council Canada, Institute for Research in Construction, Volume 3, Issue 2, pp 918-942, 2010.

RCCTE (2006) – “Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios”, aprovado pelo Decreto-Lei nº 80/2006 de 4 de abril.

Reim M.; Beck A.; Korner W.; Petricevic R.; Glora M.; Weth M.; Schliermann T.; Fricke J.; Schmidt C.H.; Potter F.J. (2002) – “Highly insulation aerogel glazing for solar energy use”. Solar Energy, Volume 72, Issue 1, January 2002, pp 21-29.

Senff L.; Ascensão G.; Hotza D.; Ferreira V.M.; Labrincha J.A. (2016) – “Assessment of the single and combined effect of superabsorbent particles and porogenic agents in nanotitania-containing mortars”. Energy and Buildings, Volume 127, September 2016, pp 980-990.

Serina Ng.; Jelle B.; Sandberg L. (2015) – “Insulating and Strength Properties of an Aerogel-Incorporated Mortar Based an UHPC Formulations”. Key Engineering Materials, Volumes 629-630, pp 43-48.

Soares A.; Feiteira J.; Flores-Colen I; De Brito J. (2012) – “Argamassas de revestimento com nanoaerogel de sílica”. Congresso Nacional Construção 2012, Coimbra, 2012.

Soares A.; Júlio M.; Flores-Colen I.; Ilharco L.; De Brito J.; Gaspar J. (2014) – “Water-resistance of mortars with lightweight aggregates”. Key Engineering Materials, Volume 634, pp 46-53.

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

Vale H. (2014) – “Caracterização experimental do comportamento mecânico de argamassas de desempenho térmico melhorado”. Dissertação de Mestrado, Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2014.

Veiga M.R. (2001) – “Comportamento de argamassas de revestimento de paredes – Contribuição para o estudo da sua resistência à fendilhação”. Dissertação de Doutoramento, Universidade Técnica de Porto, Porto, 2001.

Veiga M.R; Malanho S. (2012) – “ETICS e argamassas térmicas: novos desafios de desempenho e sustentabilidade”, Seminário TEKTÓNICA 2012, LNEC, Lisboa.

Vieira N.; Sequeira P.; Soares A.; Silva L.; Flores-Colen I. (2015) – “Influência de Parâmetros de Mistura no Comportamento de uma Argamassa Pré-Doseada com Propriedades Isolantes para Revestimento de Paredes”. CONPAT 2015, Lisboa, 2015.

Referências de Internet

[W1] Weber Saint-Gobain - <http://www.weber.com.pt/isolamento-termico-pelo-exterior/solucoes/sistemas-webertherm/sistema-webertherm-classic.html>, consultado em novembro de 2016.

[W2] Supra Painel Materiais de Construção, Lda - <http://www.suprapainel.pt/produtosEtics.html>, consultado em novembro de 2016.

[W3] EMODICO - <http://www.euromortar.com/emodico/pt/show/mortar/#en>, consultado em novembro 2016.

[W4] Weber Saint-Gobain - <http://www.weber.com.pt/isolamento-termico-pelo-exterior/conselhos-e-ajuda/artigos-tecnicos.html>, consultado em dezembro de 2016.

- [W5] FuturEng - <http://www.futureeng.pt/eps>, consultado em novembro de 2016.
- [W6] Sotecnisol Materiais - <http://www.sotecnisol.pt/materiais/produtos/solucoes-de-impermeabilizacao-isolamentos-e-drenagens/isolamentos-termicos-novo/poliestireno-expandido-novo/granulado/>, consultado em novembro de 2016.
- [W7] Manual de jardinagem - <http://manualdejardinagem.blogspot.com/2011/07/perlita.html>, consultado em novembro de 2016.
- [W8] The Perlite Institute, “Lightweight Fiber Reinforced Perlite Cement Plasters” <https://www.perlite.org/library-perlite-info/construction-perlite/Lightweight-Fiber-Reinforced-Perlite-Cement-Plasters.pdf>, consultado em dezembro de 2016.
- [W9] InfoEscola - <http://www.infoescola.com/materiais/aerogel/>, consultado em dezembro de 2016.
- [W10] Green Head - <http://www.thegreenhead.com/2011/02/aerogel-worlds-lightest-lowest-density-solid.php>, consultado em dezembro de 2016.
- [W11] Aspen Aerogels Inc. - <http://www.aerogel.com/products-and-solutions/all-insulation-products/>, consultado em dezembro de 2016.
- [W12] Business Wire- <http://www.businesswire.com/news/home/20150325005562/en/High-Performance-Insulating-Plaster-Cabot%E2%80%99s-Aerogel-Named-Innovative>, consultado em outubro de 2016.
- [W13] – DiaSen, “Diathonite o reboco com cortiça - Térmico, desumidificante, absorvente acústico, isolante acústico e amigo do ambiente”, Itália.
- [W14] Enersens, Groupe PCAS (2013) – Ficha Técnica do ISOGEL, França, 2013.
- [W15] Secil Martingança S.A. (2015) – “ISODUR: Reboco Térmico Projetado”. Ficha Técnica do ISODUR, Portugal, 2015.
- [W16] Weber Saint-Gobain (2009) – “CONDIÇÕES TÉCNICAS ESPECIAIS - Sistema weber.therm”. Portugal, 2009.
- [W17] Weber Saint-Gobain (2016) – Ficha Técnica weber.therm aislone, Portugal, 2016.
- [W18] EPS Packaging Group (s.d) – “Expanded Polystyrene (EPS) and the Environment”.

Anexos

Anexo A1 - Massa volúmica aparente

Tabela A1.0.1 Resultados individuais da massa volúmica aparente em estado fresco (Fase 1).

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	m [g]	ρ [kg/m ³]	Designação	m [g]	ρ [kg/m ³]
0,00	A ⁰	75,65	378,25	S ⁰	87,00	435,00
0,25	A ²⁵	67,30	336,50	S ²⁵	61,35	306,75
0,56	A ⁵⁶	65,90	329,50	S ⁵⁶	60,60	303,00
1,19	A ¹¹⁹	53,60	268,00	S ¹¹⁹	46,40	232,00
1,33	A ¹³³	62,75	313,75	S ¹³³	53,30	266,50
1,81	A ¹⁸¹	56,00	280,00	S ¹⁸¹	49,85	249,25

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; ρ – massa volúmica aparente.

Tabela A1.0.2 Resultados individuais da massa volúmica aparente em estado fresco (Fase 3).

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	m [g]	ρ [kg/m ³]	Designação	m [g]	ρ [kg/m ³]
1,00	A ¹⁰⁰	64,7	323,50	S ¹⁰⁰	52,55	262,75
1,33	A ¹³³	65,85	329,25	S ¹³³	49,45	247,25

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; ρ – massa volúmica aparente.

Tabela A1.0.3 Resultados individuais da massa volúmica para A^{EPS}, em estado endurecido (Fase 1).

Aerogel/A ^{EPS}	Designação	Amostra 1 [g]	Amostra 2 [g]	Média [g]	ρ [kg/m ³]
0,00	A ⁰	13,30	13,25	13,28	234,75
0,25	A ²⁵	11,20	10,90	11,05	195,41
0,56	A ⁵⁶	10,60	10,50	10,55	186,56
1,19	A ¹¹⁹	7,65	7,85	7,75	137,05
1,33	A ¹³³	9,30	8,70	9,00	159,15
1,81	A ¹⁸¹	7,00	7,40	7,20	127,32
1,81*	A ^{181*}	39,35	38,45	38,90	152,87

Legenda: A^{EPS} – argamassa industrial com agregado isolante de EPS; ρ – massa volúmica aparente; *Amostra cilíndrica de dimensões superiores.

Tabela A1.0.4 Resultados individuais da massa volúmica para A^{Perlite}, em estado endurecido (Fase 1).

Aerogel/A ^{Perlite}	Designação	Amostra 1 [g]	Amostra 2 [g]	Média [g]	ρ [kg/m ³]
0,00	S ⁰	11,35	11,6	11,475	202,92
0,25	S ²⁵	8,9	9	8,95	158,27
0,56	S ⁵⁶	10,15	9,75	9,95	175,95
1,19	S ¹¹⁹	7,35	-	7,35	129,98
1,33	S ¹³³	8,45	8,5	8,475	149,87
1,81	S ¹⁸¹	8	7,95	7,975	141,03

Legenda: A^{Perlite} – argamassa industrial com agregado isolante de perlite; ρ – massa volúmica aparente.

Tabela A1.0.5 Resultados individuais da massa volúmica aparente em estado endurecido (Fase 2).

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	m [g]	ρ [kg/m ³]	Designação	m [g]	ρ [kg/m ³]
1,19	A ¹¹⁹	77,45	132,94	S ¹¹⁹	63,30	116,49
1,33	A ¹³³	81,20	143,47	S ¹³³	-	-
1,81	A ¹⁸¹	60,50	105,45	S ¹⁸¹	64,35	114,57

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; ρ – massa volúmica aparente.

Tabela A1.0.6 Resultados individuais da massa volúmica aparente em estado endurecido (Fase 3).

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	m [g]	ρ [kg/m ³]	Designação	m [g]	ρ [kg/m ³]
1,00	A ¹⁰⁰	26,20	102,62	S ¹⁰⁰	*	*
1,33	A ¹³³	26,50	103,80	S ¹³³	*	*

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; ρ – massa volúmica aparente. *Amostras destruídas, sem valor atribuído.

Tabela A1.0.7 Resultados individuais da massa volúmica aparente para A^{EPS}, em estado endurecido seco (Fase 1).

Aerogel/A ^{EPS}	Designação	Amostra 1 [g]	Amostra 2 [g]	Média [g]	ρ [kg/m ³]
0,00	A ⁰	12,85	12,80	12,83	226,80
0,25	A ²⁵	10,45	10,10	10,28	181,70
0,56	A ⁵⁶	9,80	9,75	9,78	172,86
1,19	A ¹¹⁹	7,15	6,90	7,03	124,23
1,33	A ¹³³	8,40	9,10	8,75	154,73
1,81	A ¹⁸¹	6,80	7,15	6,98	123,35
1,81*	A ^{181*}	37,85	37,00	37,43	147,07

Legenda: A^{EPS} – argamassa industrial com agregado isolante de EPS; ρ – massa volúmica aparente; *Amostra cilíndrica de dimensões superiores.

Tabela A1.0.8 Resultados individuais da massa volúmica aparente para A^{Perlite}, em estado endurecido seco (Fase 1).

Aerogel/A ^{Perlite}	Designação	Amostra 1 [g]	Amostra 2 [g]	Média [g]	ρ [kg/m ³]
0,00	S ⁰	11,45	11,25	11,35	200,71
0,25	S ²⁵	8,65	8,75	8,7	153,85
0,56	S ⁵⁶	10,35	10,05	10,2	180,38
1,19	S ¹¹⁹	7	-	7	123,79
1,33	S ¹³³	8,5	8,35	8,425	148,99
1,81	S ¹⁸¹	7,75	7,8	7,775	137,49

Legenda: A^{Perlite} – argamassa industrial com agregado isolante de perlite; ρ – massa volúmica aparente.

Tabela A1.0.9 Resultados individuais da massa volúmica aparente em estado endurecido (Fase 3).

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	m [g]	ρ [kg/m ³]	Designação	m [g]	ρ [kg/m ³]
1,00	A ¹⁰⁰	25,15	98,51	S ¹⁰⁰	*	*
1,33	A ¹³³	25,50	99,88	S ¹³³	*	*

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; ρ – massa volúmica aparente. *Amostras destruídas, sem valor atribuído.

Anexo A2 – Condutibilidade térmica

Tabela A2.0.1 Resultados individuais da condutibilidade térmica para A^{EPS} (Fase 1).

Aerogel/A ^{EPS}	Designação	Amostra 1 [W/m.K]	Amostra 2 [W/m.K]	λ [W/m.K]
0,00	A ⁰	0,0538	0,0546	0,0542
0,25	A ²⁵	0,0452	0,0451	0,0452
0,56	A ⁵⁶	0,0422	0,0438	0,0430
1,19	A ¹¹⁹	0,0374	0,0376	0,0375
1,33	A ¹³³	0,0430	0,0426	0,0428
1,81	A ¹⁸¹	0,0409	0,0412	0,0411
1,81*	A ^{181*}	0,0393	0,0393	0,0393

Legenda: A^{EPS} – argamassa industrial com agregado isolante de EPS; λ – condutibilidade térmica; *Amostra cilíndrica de dimensões superiores.

Tabela A2.0.2 Resultados individuais da condutibilidade térmica para A^{Perlite} (Fase 1).

Aerogel/A ^{EPS}	Designação	Amostra 1 [W/m.K]	Amostra 2 [W/m.K]	λ [W/m.K]
0,00	A ⁰	0,0547	0,0546	0,0547
0,25	A ²⁵	0,0482	0,0485	0,0484
0,56	A ⁵⁶	0,0464	0,0466	0,0465
1,19	A ¹¹⁹	0,0414	*	0,0414
1,33	A ¹³³	0,0415	0,0417	0,0416
1,81	A ¹⁸¹	0,0412	0,0409	0,0411

Legenda: A^{Perlite} – argamassa industrial com agregado isolante de perlite; λ – condutibilidade térmica. *Amostras destruídas, sem valor atribuído.

Tabela A2.0.3 Resultados individuais da condutibilidade térmica (Fase 2).

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	λ [W/m.K]	Designação	λ [W/m.K]
1,19	A ¹¹⁹	0,0343	S ¹¹⁹	0,0307
1,33	A ¹³³	0,0346	S ¹³³	*
1,81	A ¹⁸¹	0,0288	S ¹⁸¹	0,0264

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; λ – condutibilidade térmica. *Amostras destruídas, sem valor atribuído.

Tabela A2.0.4 Resultados individuais da condutibilidade térmica (Fase 3).

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	λ [W/m.K]	Designação	λ [W/m.K]
1,00	A ¹⁰⁰	0,0274	S ¹⁰⁰	0,0331
1,33	A ¹³³	0,0285	S ¹³³	*

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; λ – condutibilidade térmica. *Amostras destruídas, sem valor atribuído.

Tabela A2.0.5 Resultados individuais da condutibilidade térmica para A^{EPS}, em estado seco (Fase 1).

Aerogel/A ^{EPS}	Designação	Amostra 1 [W/m.K]	Amostra 2 [W/m.K]	λ [W/m.K]
0,00	A ⁰	0,0507	0,0507	0,0507
0,25	A ²⁵	0,0427	0,0423	0,0425
0,56	A ⁵⁶	0,0404	0,0405	0,0405
1,19	A ¹¹⁹	0,036	0,0361	0,0361
1,33	A ¹³³	0,0417	0,041	0,0414
1,81	A ¹⁸¹	0,0405	0,0405	0,0405
1,81*	A ^{181*}	0,0363	0,0365	0,0364

Legenda: A^{EPS} – argamassa industrial com agregado isolante de EPS; λ – condutibilidade térmica; *Amostra cilíndrica de dimensões superiores.

Tabela A2.0.6 Resultados individuais da condutibilidade térmica para A^{Perlite}, em estado seco (Fase 1).

Aerogel/A ^{EPS}	Designação	Amostra 1 [W/m.K]	Amostra 2 [W/m.K]	λ [W/m.K]
0,00	A ⁰	0,0539	0,054	0,05395
0,25	A ²⁵	0,0477	0,0478	0,04775
0,56	A ⁵⁶	0,0458	0,0461	0,04595
1,19	A ¹¹⁹	0,0416	*	0,0416
1,33	A ¹³³	0,0415	0,0415	0,0415
1,81	A ¹⁸¹	0,0407	0,0411	0,0409

Legenda: A^{Perlite} – argamassa industrial com agregado isolante de perlite; λ – condutibilidade térmica. *Amostras destruídas, sem valor atribuído.

Tabela A2.0.7 Resultados individuais da condutibilidade térmica em estado seco (Fase 2).

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	λ [W/m.K]	Designação	λ [W/m.K]
1,19	A ¹¹⁹	0,0272	S ¹¹⁹	0,0266
1,33	A ¹³³	0,0274	S ¹³³	*
1,81	A ¹⁸¹	0,0256	S ¹⁸¹	0,0226

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; λ – condutibilidade térmica. *Amostras destruídas, sem valor atribuído.

Tabela A2.0.8 Resultados individuais da condutibilidade térmica em estado seco (Fase 3).

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	λ [W/m.K]	λ [W/m.K]**	Designação	λ [W/m.K]
1,00	A ¹⁰⁰	0,0230	0,0235	S ¹⁰⁰	*
1,33	A ¹³³	0,0251	0,0239	S ¹³³	*

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; λ – condutibilidade térmica. *Amostras destruídas, sem valor atribuído.
**Método HFM.

Anexo A3 – Resistência à compressão

Tabela A3.0.1 Resultados individuais da resistência à compressão.

Aerogel/A ^{Ind}	Designação	Fc [KN]	f _c [MPa]	Designação	Fc [KN]	f _c [MPa]
0,00	A ⁰	0,49	0,31	S ⁰	0,15	0,09
0,25	A ²⁵	0,32	0,20	S ²⁵	0,15	0,09
0,56	A ⁵⁶	0,19	0,12	S ⁵⁶	0,09	0,06
1,19	A ¹¹⁹	0,08	0,05	S ¹¹⁹	0,02	0,01
1,33	A ¹³³	0,15	0,09	S ¹³³	0,05	0,03
1,81	A ¹⁸¹	0,08	0,05	S ¹⁸¹	0,06	0,04

Legenda: A^{Ind} – argamassa industrial em pó; Fc - Carga aplicada; f_c – resistência à compressão.

Anexo A4 – Módulo de elasticidade e de torção

Tabela A4.0.1 Resultados individuais do módulo de elasticidade dinâmico e de torção para A^{EPS}.

Aerogel/A ^{EPS}	ff [KHz] Flexão	ff [KHz] Torsão	Massa [g]	G [MPa]	G (Média) [MPa]	E [MPa]	E (Média) [MPa]
0,00	2,09	2,86	8,26	64,05	59,78	153,15	144,89
	2,05	2,77	7,63	55,50		136,63	
0,25	1,25	1,83	6,36	20,19	20,81	41,72	44,58
	1,32	1,87	6,46	21,42		47,43	
0,56	0,97	1,41	5,91	11,14	11,10	23,46	23,46
	1,01	1,46	5,47	11,05		23,45	
1,19	0,46	1,01	4,16	4,02	4,22	3,83	3,90
	0,47	1,05	4,22	4,41		3,97	
1,33	0,55 *	0,63 *	5,40 *	2,00 *	2,00	7,02 *	7,02
1,81	0,47 *	0,58 *	4,39 *	1,41 *	1,41	4,22 *	4,22

Legenda: A^{EPS} – argamassa industrial em pó com EPS como agregado leve maioritário; f_f – Frequência do modo de vibração à flexão e à torção [KHz]; E – Módulo de elasticidade dinâmico; G – Módulo de torção. *Amostras destruídas, sem valor atribuído.

Tabela A4.0.2 Resultados individuais do módulo de elasticidade dinâmico e de torção para A^{Perlite}.

Aerogel/A ^{Perlite}	ff [KHz] Flexão	ff [KHz] Torsão	Massa [g]	G [MPa]	E [MPa]
0,00	1,8	1,47	6,13	12,57	85,39
0,25	*	*	*	*	*
0,56	0,49	0,62	5,60	2,04	6,00
1,19	1,46	1,42	5,60	10,72	51,32
1,33	0,38	0,56	4,20	1,23	2,55
1,81	0,41	0,63	4,30	1,60	3,12

Legenda: A^{Perlite} – argamassa industrial em pó com EPS como agregado leve maioritário; f_f – Frequência do modo de vibração à flexão e à torção [KHz]; E – Módulo de elasticidade dinâmico; G – Módulo de torção. *Amostras destruídas, sem valor atribuído.