

AVALIAÇÃO DA CONDUTIBILIDADE TÉRMICA DE ARGAMASSAS TÉRMICAS COM EPS, CORTIÇA E AEROGEL APÓS ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL ACELERADO

Léo Pinchard ^{1,2}, João L. Parracha ^{1,3}, Rosário Veiga ¹, Luís Matias ¹

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) | Portugal

² École Centrale de Lyon | França

³ CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa | Portugal

Autor correspondente: jparracha@lnec.pt

Palavras-chave

Argamassas térmicas; Avaliação da durabilidade; Envelhecimento artificial acelerado; Desempenho térmico

Resumo

A aplicação de argamassas de desempenho térmico melhorado em sistemas multicamada de isolamento térmico pelo exterior tem sido cada vez mais frequente, quer em construção nova, quer na reabilitação térmica de fachadas de edifícios. Estas argamassas são avaliadas de acordo com a norma europeia EN 998-1, exigindo-se uma condutibilidade térmica inferior a 0,2 W/(m.K) para uma temperatura média de ensaio de 10 °C. Por sua vez, o desempenho e a durabilidade de sistemas multicamada de isolamento térmico pelo exterior, com a incorporação destas argamassas, são avaliados de acordo com o documento de avaliação técnica europeia EAD 040427-00-0404. No entanto, tendo em conta o carácter inovador destas argamassas e sistemas, existem ainda poucos estudos disponíveis na literatura que avaliem o seu desempenho a longo prazo, nomeadamente no que diz respeito ao desempenho térmico. Com o presente estudo, pretende-se avaliar a condutibilidade térmica, a longo prazo, de três argamassas térmicas com agregados leves de EPS, cortiça e aerogel de sílica. A condutibilidade térmica das argamassas foi avaliada antes, durante e após exposição em três ensaios de envelhecimento artificial acelerado, nomeadamente, exposição a elevadas temperaturas, ciclos de gelo-degelo e exposição a elevados níveis de humidade. Para cada ensaio, foi utilizado um modelo empírico (i.e., equação de *Arrhenius*, modelo de *Peck* e equação de *Coffin-Manson*) para calcular o fator de aceleração, permitindo assim correlacionar os resultados dos envelhecimentos acelerado e natural e, desta forma, estimar o desempenho térmico que se obteria após 10 anos de exposição natural em condições normais de utilização. Os resultados demonstraram um aumento máximo de 29% de condutibilidade térmica após envelhecimento artificial acelerado.

1. INTRODUÇÃO

O setor dos edifícios é responsável por mais de 40% do consumo global de energia e por cerca de 33% das emissões de gases com efeito de estufa [1]. A União Europeia implementou, por isso, uma forte política ambiental para se tornar a primeira economia e sociedade com impacto neutro no clima até 2050, cumprindo assim os objetivos propostos no Acordo de Paris [2]. Neste sentido, tem havido uma adaptação e atualização do setor da construção através da procura de novos sistemas, soluções e processos construtivos mais sustentáveis e que, ao mesmo tempo, respondam às crescentes exigências de conforto higrotérmico dos edifícios.

A aplicação de argamassas de desempenho térmico melhorado em sistemas multicamada de isolamento térmico pelo exterior tem sido cada vez mais frequente, quer em construção nova, quer na reabilitação térmica de fachadas de edifícios. A incorporação de agregados leves na composição da argamassa, tal como de aditivos introdutórios de ar, contribui fortemente para a melhoria do seu desempenho térmico [3]. Estas argamassas são avaliadas de acordo com a norma europeia EN 998-1 [4], exigindo-se uma condutibilidade térmica inferior a 0,2 W/(m.K) (classe T2) ou a 0,1 W/(m.K) (classe T1) para uma temperatura média de ensaios de 10 °C. Por sua vez, o desempenho e a durabilidade de sistemas multicamada de isolamento térmico pelo exterior (ETICS), com incorporação destas argamassas, são avaliados de acordo com o especificado no guia de avaliação técnica europeia EAD 040427-00-0404 [5]. Quando aplicada nestes sistemas, a argamassa pode contribuir para colmatar ou agravar algumas das desvantagens identificadas nos ETICS ao longo dos últimos anos [6]. Essas desvantagens incidem principalmente no desenvolvimento de condensações internas, na aderência entre os diferentes componentes do sistema, na sua resistência ao choque, na alteração da cor e na suscetibilidade à colonização biológica [7].

No entanto, tendo em conta o carácter inovador destas argamassas e sistemas, existem ainda poucos estudos disponíveis na literatura que avaliem o seu desempenho a longo prazo, nomeadamente no que diz respeito ao desempenho térmico. De facto,

o desempenho a longo prazo destes sistemas e dos seus componentes pode vir a ser afetado pelo efeito sinérgico de vários agentes e mecanismos de degradação (p. ex., humidade, temperaturas elevadas, radiação solar, poluição ou colonização biológica) [8]. Como alguns destes mecanismos necessitam de algum tempo para se desenvolver, os efeitos por eles causados são apenas significativos após um longo período de tempo. Por isso, julga-se de extrema importância avaliar o desempenho a longo prazo destes materiais. No entanto, a monitorização do desempenho dos sistemas ao longo do tempo é, naturalmente, de difícil execução devido ao tempo requerido. Para ultrapassar este problema, podem utilizar-se métodos de envelhecimento artificial acelerado em laboratório, que utilizam modelos empíricos. Estes métodos consistem em expor o material a condições ambientais extremas em comparação com aquelas que ocorrem naturalmente, tornando possível obter-se níveis de degradação equivalentes a várias décadas de exposição natural em algumas semanas ou meses de avaliação laboratorial. Todavia, importa referir que os métodos de envelhecimento artificial acelerado fornecem apenas uma indicação do desempenho do material a longo prazo numa área geográfica previamente determinada, sendo necessária alguma atenção na comparação e generalização com os resultados obtidos nos ensaios de exposição natural.

Utilizando estes métodos, Berardi et al. [9] avaliaram o desempenho de argamassas com diferentes quantidades de aerogel de sílica antes e depois de serem sujeitas a ciclos de gelo-degelo, a temperaturas elevadas e a elevados níveis de humidade relativa, equivalentes a 20 anos de exposição natural no Canadá. Os resultados demonstraram um aumento ligeiro da condutibilidade térmica das argamassas após envelhecimento. Por outro lado, Parracha et al. [8] estudaram a influência da exposição à radiação ultravioleta, aos poluentes atmosféricos e aos ciclos higrotérmicos na durabilidade de ETICS com placas de isolamento térmico. Os resultados demonstraram uma alteração significativa das propriedades superficiais dos sistemas (p. ex. rugosidade, cor, brilho) após os ciclos higrotérmicos, o que favoreceu um aumento da suscetibilidade à colonização biológica dos sistemas.

Com o presente estudo, pretende-se avaliar a condutibilidade térmica, a longo prazo, de três argamassas térmicas com agregados leves de EPS, cortiça e aerogel de sílica. A condutibilidade térmica das argamassas foi avaliada antes, durante e após exposição em três ensaios de envelhecimento artificial acelerado, incluindo exposição a elevadas temperaturas, ciclos de gelo-degelo e exposição a elevados níveis de humidade. Para cada ensaio, foi utilizado um modelo empírico (i.e., equação de *Arrhenius*, modelo de *Peck* e equação de *Coffin-Manson*) para calcular o fator de aceleração, permitindo assim correlacionar os resultados dos envelhecimentos acelerado e natural e, desta forma, estimar o desempenho térmico que se obteria após 10 anos de exposição natural.

2. MATERIAIS

Neste trabalho, analisaram-se três argamassas térmicas (AER, EPS, COR) e uma argamassa de referência (REF). A argamassa térmica AER é uma argamassa produzida industrialmente, cuja composição exata é desconhecida devido a confidencialidade industrial. No entanto, sabe-se que se trata de uma argamassa de base cimentícia, composta por ligantes minerais, resinas, agentes hidrofóbicos e agregados leves de aerogel de sílica (Figura 1A).

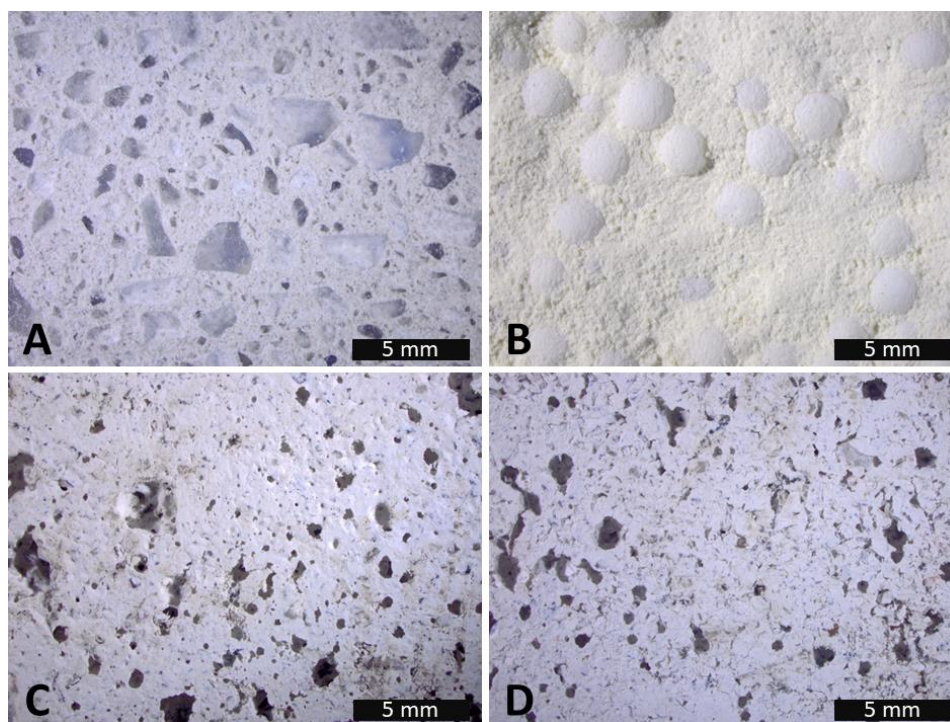


Figura 1. Argamassas ensaiadas no estudo: (A) AER, (B) EPS, (C) COR e (D) REF.

A argamassa térmica EPS é uma argamassa produzida industrialmente e disponível no mercado. Trata-se de uma argamassa com matriz de cal, agregados leves de EPS, agregados minerais e aditivos. Embora a proporção volumétrica e a dimensão dos agregados leves não se encontrem especificadas na ficha técnica do produto, as observações das amostras à lupa binocular permitiram estimar o diâmetro dos agregados de EPS entre 1 mm e 2 mm (Figura 1B).

As argamassas COR e REF (Figuras 1C e 1D) foram produzidas em laboratório com uma relação volumétrica ligante (NHL 3.5) / agregado de 1:3, com 50% de substituição de areia por agregados leves de cortiça no caso da argamassa COR e com 100% de areia no caso da argamassa de referência (REF). A relação água/ligante (1,7) foi previamente otimizada para obter uma boa trabalhabilidade. Os valores da massa volúmica aparente dos vários componentes das argamassas foram determinados de acordo com a norma EN 1097-3 [10] e são os seguintes: cal hidráulica natural (NHL 3.5) – 687 kg/m³; areia – 1452 kg/m³; e cortiça expandida – 225 kg/m³. Para além disso, a dimensão dos agregados leves de cortiça varia entre 1 mm e 2 mm. Na Tabela 1 apresentam-se algumas das propriedades das argamassas, disponíveis nas fichas técnicas ou em estudos prévios dos autores [6, 11, 12].

Tabela 1. Propriedades das argamassas avaliadas no estudo.

Características	Argamassas			
	AER	EPS	COR	REF
Massa volúmica (kg/m ³)	165 ± 11	150 ± 5	1175 ± 38	1748 ± 28
Fator de resistência à difusão de vapor de água (-)	7,8 ± 0,1	≤ 5,0	7,0 ± 0,1	8,8 ± 0,1
Coefficiente de capilaridade (kg/(m ² .min ^{0,5}))	1,00 ± 0,04	< 0,400	1,30 ± 0,20	2,78 ± 0,05
Resistência à compressão (MPa)	0,227 ± 0,002	≥ 0,400	0,300 ± 0,080	0,500 ± 0,100
Resistência à flexão (MPa)	0,099 ± 0,004	≥ 0,250	0,110 ± 0,060	0,260 ± 0,020

3. MÉTODOS

A condutibilidade térmica das argamassas foi avaliada antes, durante e após exposição em três ensaios de envelhecimento artificial acelerado, incluindo exposição a elevadas temperaturas, ciclos de gelo-degelo e exposição a elevados níveis de humidade. Para cada ensaio, foi utilizado um modelo empírico (i.e., equação de *Arrhenius*, modelo de *Peck* e equação de *Coffin-Manson*) para calcular o fator de aceleração, permitindo assim correlacionar os resultados dos envelhecimentos acelerado e natural e, desta forma, estimar o desempenho térmico que se obteria após 10 anos de exposição natural.

Considerando uma escala microscópica, o aumento da temperatura de um material resulta num aumento da energia do movimento molecular. Assim, as colisões entre moléculas são favorecidas, o que acelera as reações de degradação [11]. A relação entre o fator de reação k e a temperatura T pode ser expressa através da equação de *Arrhenius* [13] (Equação 1):

$$k(T) = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (1)$$

, em que E_a é a energia de ativação da reação, em J/mol, R é a constante dos gases perfeitos ($R = 8,314 \text{ J/(mol.K)}$), T é a temperatura do material, em *Kelvin*, e A é uma constante de proporcionalidade. Um provete de cada argamassa com dimensões de 300 mm × 300 mm × 50 mm foi colocado verticalmente numa estufa da *Cassel* (Figura 2A) regulada a uma temperatura constante de $T_{ag} = 70 \text{ °C}$. O fator de aceleração f_T é obtido através da Equação 2, considerando a temperatura de envelhecimento artificial (T_{ag}) e a temperatura nas condições normais de utilização (T_{nat}).

$$f_T = \frac{k(T_{ag})}{k(T_{nat})} = \exp\left(-\frac{E_a}{R}\left(\frac{1}{T_{ag}} - \frac{1}{T_{nat}}\right)\right) \quad (2)$$

Considerando que as argamassas térmicas são normalmente aplicadas em sistemas ETICS, assumiu-se que, em condições de utilização normais, a temperatura das argamassas é semelhante à temperatura exterior. Assim, $T_{nat} = 17,2 \text{ °C}$, que corresponde à média das temperaturas diárias registadas em Lisboa no ano de 2020, de acordo com os dados fornecidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). Para a energia de ativação da reação (E_a) considerou-se um valor de 70 kJ/mol, de acordo com estudos anteriores [14].

Assim, obteve-se um fator de aceleração de 84 (Tabela 2), indicando que são necessários 43 dias de envelhecimento com exposição a elevadas temperaturas para um equivalente a 10 anos de envelhecimento natural.

Para avaliar a influência de elevados níveis de humidade no desempenho a longo prazo das argamassas térmicas, os provetes foram colocados numa câmara climática *Aralab FC700EDTU*, com temperatura e humidade constantes. Para se obter um fator de

aceleração suficientemente elevado, o valor da humidade relativa foi fixado em 80% e o valor da temperatura em 60 °C. Os provetes foram colocados na vertical sobre uma grelha metálica (Figura 2B), permitindo uma humidificação homogénea das faces dos provetes.

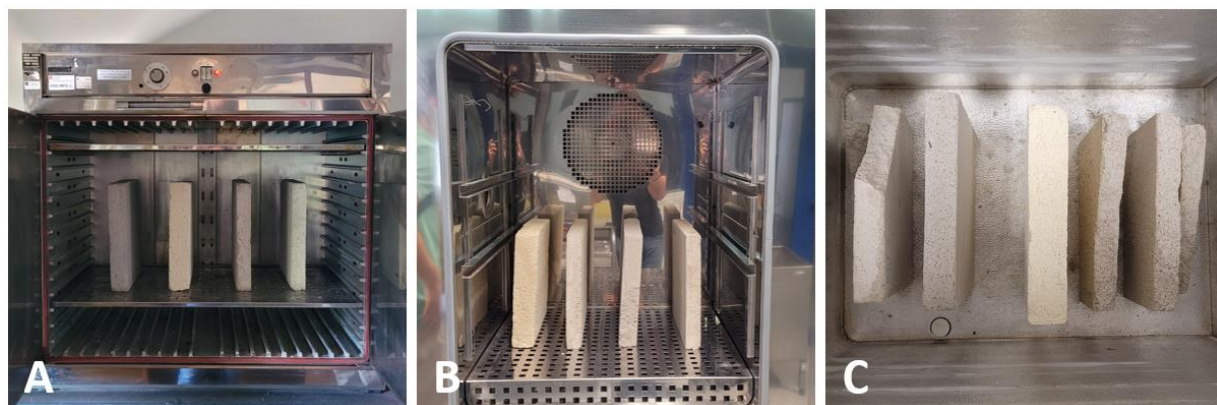


Figura 2. Disposição dos provetes nas câmaras de envelhecimento artificial acelerado a elevadas temperaturas (A), com elevados níveis de humidade (B) e com ciclos de gelo-degelo (C).

Tabela 2. Fatores de aceleração e número de dias em envelhecimento artificial acelerado equivalente a 10 anos de envelhecimento natural.

Envelhecimento artificial acelerado	Fator de aceleração	Número de dias de envelhecimento artificial acelerado equivalente a 10 anos de envelhecimento natural
Elevadas temperaturas	84	43
Elevados níveis de humidade	56	65
Ciclos de gelo-degelo	270	14

O modelo de *Peck* [9] avalia a correlação entre o teor de humidade e a taxa de degradação, tendo sido utilizado no presente estudo para o cálculo do fator de aceleração f_{RH} , considerando elevados níveis de humidade (Equação 3).

$$f_{RH} = \left(\frac{RH_{ag}}{RH_{nat}} \right)^m \quad (3)$$

, em que RH_{ag} é a humidade relativa no interior da câmara climática (80%), RH_{nat} é a humidade relativa média em Lisboa no ano de 2020 (72%) e m é o coeficiente de *Peck*, que é dependente da energia de ativação. Para uma energia de ativação de 70 kJ/mol, obteve-se um coeficiente de *Peck* (m) de 3,53. Como a temperatura também é considerada na análise, utilizou-se um valor no interior da câmara $T_{ag} = 60$ °C e em condições normais de utilização $T_{nat} = 17,2$ °C. Assim, o fator de aceleração $f_{RH,T}$ é calculado de acordo com a Equação 4:

$$f_{RH,T} = f_{RH} f_T = \left(\frac{RH_{ag}}{RH_{nat}} \right)^m \exp \left(-\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_{ag}} - \frac{1}{T_{nat}} \right) \right) \quad (4)$$

Obteve-se um fator de aceleração de 56 (Tabela 2), o que corresponde a 65 dias de envelhecimento artificial acelerado com elevados níveis de humidade para um equivalente a 10 anos de envelhecimento natural.

Finalmente, para se avaliar a resistência ao gelo-degelo os provetes foram colocados alternadamente numa estufa da *Micrometrics* com $T = 60$ °C e num congelador da *Bauknecht* com $T = -15$ °C (Figura 2C). Os ciclos de envelhecimento artificial acelerado duraram 48 h, 24 h na estufa ($T = 60$ °C) e 24 h no congelador ($T = -15$ °C). O fator de aceleração resultante deste tipo de mecanismo de degradação é calculado através da equação de *Coffin-Manson* [15] (Equação 5).

$$f_{FT} = \left(\frac{\Delta T_{ag}}{\Delta T_{nat}} \right)^n \quad (5)$$

, em que ΔT_{ag} é a diferencial de temperatura entre o congelador (gelo) e a estufa (degelo) ($\Delta T_{ag} = 75$ °C), ΔT_{nat} é a diferença de temperatura média diária registada em condições exteriores e n é o parâmetro de *Coffin-Manson*. Considerando os dados fornecidos pelo IPMA para Lisboa (ano de 2020), obtém-se um valor de $\Delta T_{nat} = 11,6$ °C. O parâmetro de *Coffin-Manson* (n) é igual a 3 [9]. Obteve-se, assim, um fator de aceleração de 270 (Tabela 2), o que corresponde a 14 dias de envelhecimento artificial com ciclos de gelo-degelo para ser equivalente a 10 anos de envelhecimento natural.

A condutibilidade térmica dos provetes das argamassas foi determinada num equipamento de medição do fluxo de calor *Holometrix rapid-K* por método fluximétrico, de acordo com a norma EN 12667 [16]. Para monitorizar a condutibilidade térmica a longo prazo, as medições foram efetuadas antes, durante e após os vários ciclos de envelhecimento artificial acelerado. Assim, efetuaram-se duas medições intermédias para cada ensaio a aproximadamente um terço e dois terços da duração total. As medições foram efetuadas após 14 dias e 28 dias para os ciclos de exposição a elevadas temperaturas, após 23 dias e 48 dias no caso dos ciclos com elevados níveis de humidade e após 5 dias e 9 dias nos ciclos de gelo-degelo. O coeficiente de condutibilidade térmica foi calculado utilizando a Lei de Fourier (Equação 6):

$$q = \frac{\lambda}{e} (T_h - T_c) \quad (6)$$

, em que q é o fluxo de calor, em W/m^2 , λ é a condutibilidade térmica, em $W/(m.K)$, T_h e T_c são as temperaturas das placas quente e fria do equipamento, em *Kelvin*, e e é a espessura do provete. A espessura dos provetes foi determinada de acordo com a norma EN ISO 29466 [17].

A condutibilidade térmica das amostras não envelhecidas foi determinada após estabilização em ambiente condicionado com $T = 23^\circ C$ e $HR = 50\%$. As amostras envelhecidas também foram condicionadas no mesmo ambiente antes das medições intermédias, durante os ciclos de envelhecimento, e antes da medição final, após envelhecimento. De modo a considerar os efeitos das variações de humidade e da temperatura durante os ciclos de envelhecimento acelerado, corrigiu-se o valor da condutibilidade térmica medida, de acordo com o procedimento definido na norma ISO 10456 [18] (Equação 7):

$$\lambda_c = \lambda_m F_T F_u F_a \quad (7)$$

, em que λ_c é o valor da condutibilidade térmica corrigido de acordo com as condições de referência ($T = 23^\circ C$; $HR = 50\%$), λ_m é o valor medido da condutibilidade térmica e F_T , F_u e F_a são os fatores de correção para as variações de temperatura, humidade e envelhecimento entre as condições de ensaio e aquelas de referência. Como as medições foram efetuadas com apenas algumas semanas de intervalo e nas mesmas condições laboratoriais, ignorou-se o efeito do envelhecimento natural, admitindo que $F_a = 1$. Os fatores F_T e F_u foram determinados de acordo com as Equações 8 e 9:

$$F_T = \exp [f_T (T_{23,50} - T_m)] \quad (8)$$

$$F_u = \exp [f_u (U_{23,50} - U_m)] \quad (9)$$

, em que $T_{23,50}$ e $U_{23,50}$ são a temperatura, em *Kelvin*, e o teor de humidade, em m^3/m^3 , da amostra durante a medição de referência (estado não envelhecido), T_m e U_m são a temperatura e o teor de humidade da amostra durante a medição e f_T e f_u são os fatores de conversão da temperatura e da humidade, respetivamente. Os valores da temperatura foram medidos automaticamente durante o ensaio pelo equipamento, enquanto os valores do teor de humidade foram calculados a partir do volume (V , em m^3) e da massa das amostras (m_i , em kg) imediatamente antes da medição e no estado seco (m_{dry}), de acordo com a Equação 10:

$$U_i = \frac{(m_i - m_{dry})}{\rho_{water} V} \quad (10)$$

, em que i indica o conjunto de medições consideradas (p. ex., $i = 23^\circ C, 50\% HR$) e ρ_{water} é a massa volúmica da água ($1000 \text{ kg}/m^3$). Em relação aos fatores de correção, considerou-se $f_T = 0,003$ e $f_u = 4$, de acordo com o especificado na norma ISO 10456 [18].

4. RESULTADOS

Na Tabela 3 apresentam-se os resultados da condutibilidade térmica das argamassas após envelhecimento artificial acelerado com elevadas temperaturas. O menor valor de condutibilidade térmica no estado inicial foi obtido para a argamassa com aerogel de sílica, seguida da argamassa com agregados leves de EPS. De facto, apenas estas duas argamassas podem ser consideradas argamassas térmicas de acordo com os requisitos da norma EN 998-1 [4], por apresentarem condutibilidades térmicas inferiores a $0,2 \text{ W}/(m.K)$, no estado não envelhecido.

O maior agravamento da condutibilidade térmica das argamassas AER e EPS verifica-se nos primeiros 14 dias de envelhecimento artificial (3 anos de envelhecimento natural), com um aumento de aproximadamente 7% no caso da argamassa AER (Figura 3A) e de aproximadamente 10% no caso da argamassa EPS (Figura 3B). Para estas duas argamassas verifica-se depois uma estabilização do valor da condutibilidade térmica após 7 anos de envelhecimento natural, sendo que no caso da argamassa EPS o valor é até ligeiramente inferior ao obtido após 3 anos de envelhecimento natural (Figura 3B).

No caso da argamassa com agregados leves de cortiça foi apenas possível calcular o valor da condutibilidade térmica após 14 dias de envelhecimento artificial (3 anos de envelhecimento natural), uma vez que esta argamassa se partiu durante os ciclos de envelhecimento. Neste caso, registou-se um aumento de condutibilidade térmica de 20% entre o estado não envelhecido e 14 dias de envelhecimento artificial acelerado com elevadas temperaturas (Figura 3C). Finalmente, registou-se um aumento de condutibilidade térmica de 23% entre o estado inicial e 14 dias de envelhecimento artificial (3 anos de envelhecimento natural) para a argamassa de referência (Figura 3D). Este valor voltou a aumentar após 29 dias de envelhecimento artificial (7 anos de envelhecimento natural), correspondendo a um aumento de cerca de 29% em relação ao estado inicial (Tabela 3).

Tabela 3. Resultados da condutibilidade térmica das argamassas após envelhecimento artificial acelerado com elevadas temperaturas.

Envelhecimento artificial acelerado		Envelhecimento natural	Condutibilidade térmica [W/(m.K)]			
Dias	% de envelhecimento	Correspondência (anos)	AER	EPS	COR	REF
0	0	0	0,0320	0,0563	0,219	0,447
14	33	3	0,0341	0,0621	0,262	0,548
29	66	7	0,0345	0,0607	-	0,577
43	100	10	0,0346	0,0606	-	-

Na Tabela 4 apresentam-se os resultados da condutibilidade térmica das argamassas após envelhecimento artificial acelerado com elevados níveis de humidade. No caso da argamassa com agregados leves de aerogel de sílica (AER), registou-se um aumento de cerca de 7% da condutibilidade térmica entre o estado não envelhecido e após 22 dias de envelhecimento artificial acelerado (3 anos de envelhecimento natural). Este valor teve depois tendência a estabilizar, contabilizando-se um aumento de condutibilidade térmica para esta argamassa de cerca de 10% após 7 anos e 10 anos de envelhecimento natural (em relação ao estado não envelhecido) (Figura 3A). No entanto, o comportamento mais interessante foi verificado no caso da argamassa com agregados leves de EPS, em que se registou uma redução de condutibilidade térmica ao longo do envelhecimento artificial com elevados níveis de humidade. No final do ensaio, após 65 dias de envelhecimento artificial acelerado (10 anos de envelhecimento natural), registou-se um decréscimo de condutibilidade térmica para esta argamassa de cerca de 28% (Figura 3B). Esta tendência não era expectável e foi atribuída a um aumento da porosidade da argamassa causada pela dissolução de cristais de hidróxido de cálcio e silicato de cálcio hidratado durante os ciclos de envelhecimento artificial. Este aumento da porosidade foi comprovado pelos autores através de uma análise microestrutural da argamassa com microscopia de raios X [17]. Para além disso, ensaios adicionais realizados nesta argamassa após envelhecimento artificial comprovaram um aumento da absorção de água por capilaridade e uma diminuição muito significativa da resistência à compressão [19], o que vai de encontro à hipótese de um possível aumento da porosidade após envelhecimento.

No caso da argamassa com agregados leves de cortiça (COR), verificou-se um aumento da condutibilidade térmica de 3% após 22 dias de envelhecimento artificial acelerado (3 anos de envelhecimento natural). No entanto, à semelhança do que aconteceu nos ciclos de envelhecimento com elevadas temperaturas, esta argamassa partiu-se durante os ciclos de envelhecimento, tendo sido impossível efetuar medições de condutibilidade térmica adicionais. Em relação à argamassa de referência (REF) os resultados mostraram um aumento de 15% da condutibilidade térmica no final do ensaio de envelhecimento artificial, após 10 anos de envelhecimento natural (Figura 3D).

Tabela 4. Resultados da condutibilidade térmica das argamassas após envelhecimento artificial acelerado com elevados níveis de humidade.

Envelhecimento artificial acelerado		Envelhecimento natural	Condutibilidade térmica [W/(m.K)]			
Dias	% de envelhecimento	Correspondência (anos)	AER	EPS	COR	REF
0	0	0	0,0338	0,0546	0,218	0,419
22	33	3	0,0363	0,0485	0,224	0,426
43	66	7	0,0370	0,0430	-	0,467
65	100	10	0,0371	0,0393	-	0,482

Na Tabela 5 apresentam-se os resultados da condutibilidade térmica das argamassas após envelhecimento artificial acelerado com ciclos de gelo-degelo. Os resultados revelaram tendências de desempenho semelhantes às observadas após envelhecimento artificial acelerado com elevados níveis de humidade. No caso da argamassa com agregados leves de aerogel (AER), obteve-se um aumento da condutibilidade térmica de cerca de 7% após 5 dias de envelhecimento artificial (3 anos de envelhecimento natural) seguido de uma estabilização do desempenho térmico (i.e., aumento de 8% após 9 e 14 dias de envelhecimento artificial em relação ao estado não envelhecido) (Figura 3A). Para a argamassa com agregados leves de EPS, tal como observado nos ciclos com elevados níveis de humidade, verificou-se uma diminuição da condutibilidade térmica, com o menor valor a verificar-se no final do ensaio (após 14 dias de envelhecimento artificial; 10 anos de envelhecimento natural). Neste caso, registou-se uma diminuição da condutibilidade térmica de cerca de 22% em relação ao estado inicial não envelhecido (Figura 3B).

Tabela 5. Resultados da condutibilidade térmica das argamassas após envelhecimento artificial acelerado com ciclos de gelo-degelo.

Envelhecimento artificial acelerado		Envelhecimento natural	Condutibilidade térmica [W/(m.K)]			
Dias	% de envelhecimento	Correspondência (anos)	AER	EPS	COR	REF
0	0	0	0,0314	0,0523	0,194	0,412
5	33	3	0,0335	0,0431	-	0,504
9	66	7	0,0338	0,0413	0,210	0,505
14	100	10	0,0339	0,0408	0,214	0,505

Para a argamassa produzida em laboratório com agregados leves de cortiça expandida (COR), obteve-se um aumento de 10% da condutibilidade térmica no final do envelhecimento artificial acelerado com ciclos de gelo-degelo (Figura 3C). No caso da argamassa de referência, verificou-se um aumento da condutibilidade térmica de 22% após 5 dias de envelhecimento artificial (10 anos de envelhecimento natural), seguido de uma estabilização desse valor com um ligeiro aumento.

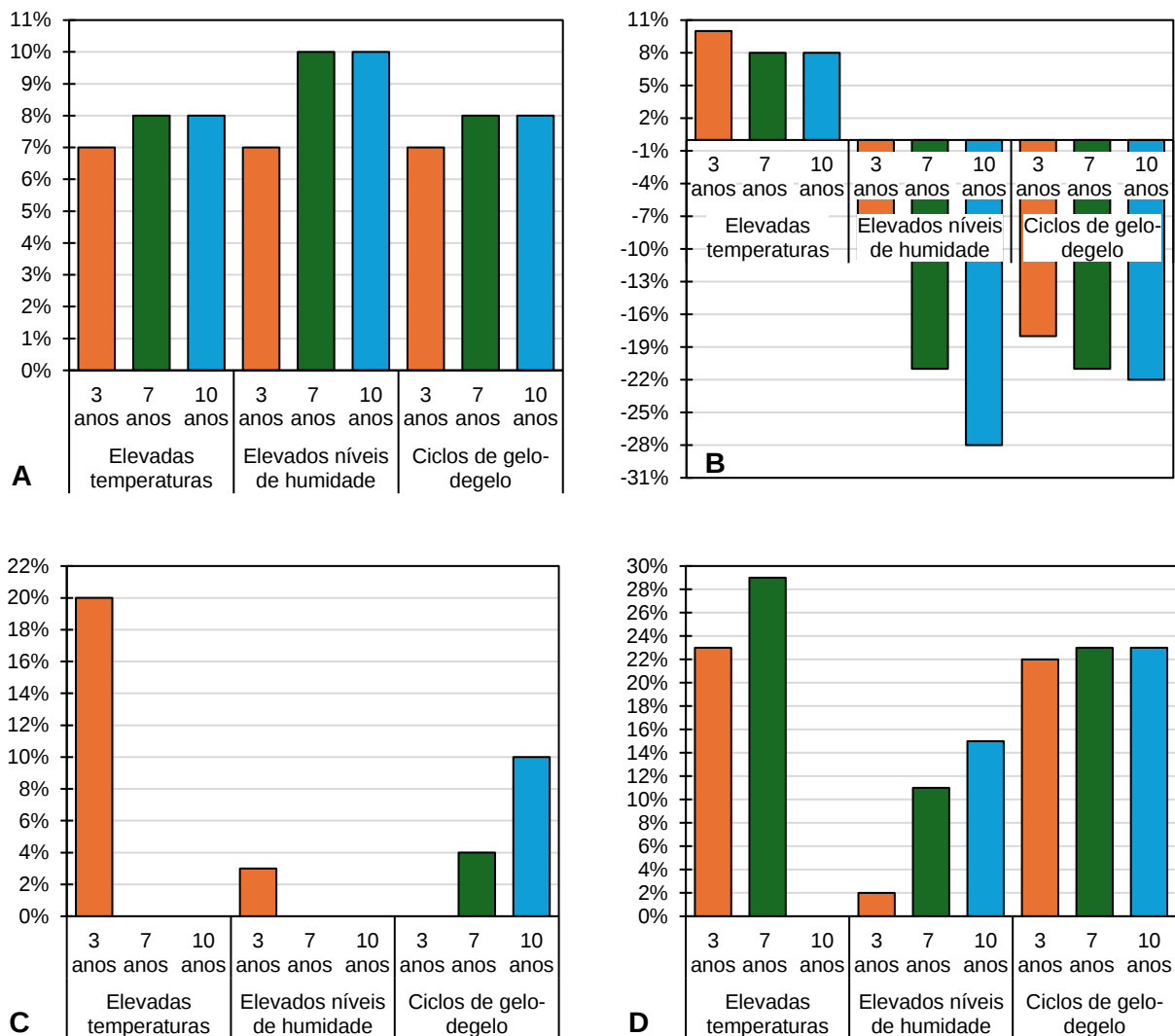


Figura 3. Variações percentuais da condutibilidade térmica das argamassas AER (A), EPS (B), COR (C) e REF (D) ao longo dos vários ciclos de envelhecimento artificial acelerado.

5. CONCLUSÕES

Com o presente estudo, pretendeu-se avaliar a condutibilidade térmica, a longo prazo, de três argamassas térmicas com incorporação de agregados leves de EPS, cortiça e aerogel de sílica. A condutibilidade térmica das argamassas foi avaliada antes, durante e após exposição em três ensaios de envelhecimento artificial acelerado, incluindo exposição a elevadas temperaturas, ciclos de gelo-degelo e exposição a elevados níveis de humidade. Para cada ensaio, foi utilizado um modelo empírico (i.e., equação

de *Arrhenius*, modelo de *Peck* e equação de *Coffin-Manson*) para calcular o fator de aceleração, permitindo assim correlacionar os resultados dos envelhecimentos acelerado e natural e, desta forma, estimar o desempenho térmico que se obteria após 10 anos de exposição natural.

Os resultados obtidos demonstraram que as argamassas térmicas produzidas industrialmente mantêm um desempenho satisfatório considerando a variação da sua condutibilidade térmica ao longo dos diferentes ciclos de envelhecimento artificial acelerado. Para estas argamassas, obteve-se um aumento máximo de condutibilidade térmica de 10% após envelhecimento artificial, o que equivale a 10 anos de envelhecimento natural em condições normais de exposição. Por outro lado, obteve-se um aumento máximo de condutibilidade térmica de 29% após envelhecimento artificial no caso das argamassas produzidas em laboratório.

Os ciclos de envelhecimento artificial acelerado com exposição a elevadas temperaturas foram aqueles que mais contribuíram para uma alteração da condutibilidade térmica das argamassas, com exceção da argamassa com incorporação de agregados leves de aerogel de sílica. Neste caso, os ciclos de envelhecimento artificial com elevados níveis de humidade foram os que mais influenciaram o desempenho térmico desta argamassa. No caso da argamassa com incorporação de agregados leves de EPS, verificou-se uma diminuição significativa (até 28%) da condutibilidade térmica após envelhecimento artificial acelerado com elevados níveis de humidade e ciclos de gelo-degelo. Estes resultados foram explicados por um aumento da porosidade da argamassa após envelhecimento o que, apesar de melhorar o seu desempenho térmico, condiciona fortemente a sua resistência mecânica e, consequentemente, a sua eficiência a longo prazo.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao LNEC o financiamento do projeto “RESUME – Edifícios para o Futuro: Resiliência e Sustentabilidade Ambiental”. Agradece-se, igualmente, às empresas Saint-Gobain e Secil pelo fornecimento das argamassas usadas na campanha experimental, bem como ao IPMA pelos dados meteorológicos disponibilizados.

Referências

- [1] European Commission, 2016. “Mapping and analyses of the current and future (2023-2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables)”, European Commission.
- [2] United Nations, 2015. “Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development”, A/RES/70/1, United Nations.
- [3] Gomes, M.G.; Flores-Colen, I.; Melo, H.; Soares, A., 2019. “Physical performance of industrial and EPS and cork experimental thermal insulation renders”, *Construction and Building Materials* 198, 786-795.
- [4] CEN, 2017. “Specification for mortar for masonry. Part 1: rendering and plastering mortar”, EN 998-1, British Standard Institution, London, UK.
- [5] EOTA, 2019. “Guideline for European technical approval of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) with mortar as thermal insulation product and renderings or discontinuous claddings as exterior skin”, EAD 040427 -00-0404, EOTA, Brussels, Belgium.
- [6] Parracha, J.L.; Veiga, R.; Nunes, L.; Flores-Colen, I., 2024. “Effects of hygrothermal and natural aging on the durability of multilayer insulation systems incorporating thermal mortars with EPS and aerogel”, *Cement and Concrete Composites* 148, 105483.
- [7] Parracha, J.L.; Veiga, R.; Gomes, M.G.; Flores-Colen, I.; Nunes, L., 2024. “Hygrothermal behaviour of external thermal insulation composite systems (ETICS) to withstand biological colonisation”, *Journal of Building Engineering* 86, 108932.
- [8] Parracha, J.L.; Borsoi, G.; Veiga, R.; Flores-Colen, I.; Nunes, L.; Garcia, A.R.; Ilharco, L.M.; Dionísio, A.; Faria, P., 2021. “Effects of hygrothermal, UV and SO₂ accelerated ageing on the durability of ETICS in urban environments”, *Building and Environment* 204, 108151.
- [9] Berardi, U.; Nosrati, R.H., 2018. “Long-term thermal conductivity of aerogel-enhanced insulating materials under different laboratory aging conditions”, *Energy* 147, 1188-1202.
- [10] CEN, 1999. “Tests for mechanical and physical properties of aggregates – Part 3: Determination of loose bulk density and voids”, EN 1097-3, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

- [11] Maia, J.; Ramos, N.M.M.; Veiga, R., 2018. "Evaluation of the hygrothermal properties of thermal rendering systems", *Building and Environment* 144, 437-449.
- [12] Pedroso, M.; Flores-Colen, I.; Silvestre, J.D.; Gomes, M.G.; Silva, L.; Sequeira, P.; de Brito, J., 2020. "Characterisation of a multilayer external wall thermal insulation system. Application in a Mediterranean climate", *Journal of Building Engineering* 30, 101265.
- [13] Laidler, K.J., 1984. "The development of the Arrhenius equation", *Journal of Chemical Education* 61, 494-498.
- [14] Jelle, B.P., 2012. "Accelerated climate ageing of building materials, components and structures in the laboratory", *Journal of Materials Science* 47, 6475-6496.
- [15] Escobar, L.A.; Meeker, W.Q., 2006. "A review of accelerated test models", *Statistical Science* 21, 552-577.
- [16] CEN, 2001. "Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Products of high and medium thermal resistance", EN 12667, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [17] CEN, 2022. "Thermal insulating products for building applications – Determination of thickness.", EN ISO 29466, European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- [18] ISO, 2007. "Building materials and products – Hygrothermal properties – Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values.", ISO 10456, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.
- [19] Pinchard, L.; Parracha, J.L.; Veiga, R.; Matias, L.; Silva, A.S.; Duarte, S.; Nunes, L., 2024. "Weather ageing effects on the long-term thermal conductivity and biological colonisation of thermal insulating mortars with EPS, cork and aerogel", *Energy & Buildings* 317, 114403.