

Avaliação da resistência à biocolonização e do desempenho à água de argamassas térmicas aplicadas em sistemas multicamada de isolamento térmico pelo exterior

JOÃO LUÍS PARRACHA^{1,2}

ROSÁRIO VEIGA¹

INÊS FLORES-COLEN²

LINA NUNES^{1,3}

¹ Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) | Lisboa | Portugal

² CERIS, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa | Lisboa | Portugal

³ cE3c, Universidade dos Açores | Açores | Portugal

Autor correspondente: jparracha@lnec.pt

Palavras-chave

Isolamento térmico pelo exterior, Argamassas térmicas, Teor de água, Bolores

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. No entanto, não existe ainda qualquer documento que permita avaliar o desempenho de sistemas multicamada de isolamento térmico pelo exterior com a incorporação destas argamassas. Nesse sentido, continua a ser necessário um estudo mais abrangente destas soluções, procurando otimizar-se a argamassa térmica, o revestimento e o desempenho do sistema multicamada de isolamento como um todo.

Com o presente estudo, pretende-se avaliar a resistência à biocolonização e o desempenho à água de três argamassas térmicas aplicadas em sistemas multicamada. Tendo como objetivo a análise dos requisitos da EN 998-1 para a argamassa térmica e a avaliação e discussão do seu desempenho em sistema multicamada, avalia-se não só o desempenho do sistema como um todo, mas também da argamassa individualmente. A análise do desempenho à água foi realizada através de ensaios de absorção capilar, secagem e permeabilidade ao vapor de água. Para a avaliação da biocolonização considerou-se uma metodologia adaptada das normas americanas *ASTM D5590-17* e *ASTM C1338-19* e validada previamente pelos autores para ETICS. Consideraram-se, ainda, duas condições de exposição: inoculação natural e inoculação artificial com uma suspensão mista de esporos de *Aspergillus niger* e *Penicillium funiculosum*.

Os resultados demonstram a importância de um bom desempenho de todos os componentes do sistema para um aumento da eficiência e durabilidade do conjunto.

1 | INTRODUÇÃO

A construção e a manutenção dos edifícios são responsáveis por mais de 35% 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 cumprir o objetivo ratificado no Acordo de Paris e se tornar a primeira economia e sociedade com impacto neutro no clima até 2050 [2]. Nesse sentido, o setor da construção tem vindo a adaptar-se e a atualizar-se através da procura de novos sistemas, soluções e processos construtivos mais sustentáveis e que 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. Estes sistemas são constituídos, em sequência, por: uma argamassa com incorporação de agregados leves (p. ex., EPS, cortiça ou aerogel de sílica) e de aditivos (nomeadamente introdutores de ar), que é aplicada por projeção mecânica na parede de fachada regularizada; uma camada de base reforçada com uma rede de fibra de vidro entre demãos; uma camada de acabamento, frequentemente aplicada por pintura a rolo.

A incorporação de agregados leves na composição da argamassa, tal como de aditivos introdutores de ar, contribui fortemente para a melhoria do seu desempenho térmico [3]. De facto, estas argamassas possuem uma baixa condutibilidade térmica, podendo ser inferior a 0,2 W/m.K (classe T2) ou a 0,1 W/m.K (classe T1), de acordo com o especificado na norma europeia EN 998-1 [4]. No entanto, a introdução deste tipo de agregados potencia também uma redução considerável da densidade da argamassa, condicionando o seu bom desempenho mecânico [5]. Adicionalmente, pode verificar-se uma alteração considerável da sua estrutura porosa, afetando o desempenho à água da argamassa térmica [6].

Quando aplicada em sistemas multicamada de isolamento térmico pelo exterior, a argamassa pode contribuir para colmatar ou agravar algumas das desvantagens identificadas nestes sistemas ao longo dos últimos anos. 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.

Num estudo de 2021, Gonçalves *et al.* [7] monitorizaram quatro sistemas multicamada de isolamento térmico pelo exterior com diferentes materiais de isolamento térmico durante um ano de exposição natural e concluíram que o risco de condensação superficial aumenta consideravelmente nos sistemas com uma maior resistência térmica, o que leva também a um maior risco de colonização biológica. Outro estudo [8] indica que um processo de secagem mais lento das camadas superficiais dos sistemas leva a que o teor de água permaneça elevado durante longos períodos de tempo, o que também conduz a um aumento do risco de colonização biológica. Adicionalmente, encontra-se amplamente divulgado que a condutibilidade térmica é fortemente influenciada pelo teor de água, registando-se um aumento significativo desse valor para maiores níveis de teor de água [9].

Assim, a avaliação da biocolonização e do desempenho à água de diferentes argamassas térmicas aplicadas em sistemas multicamada de isolamento térmico pelo exterior é de extrema importância, especialmente pelo facto de não existir ainda qualquer documento que permita avaliar o desempenho destes sistemas como um todo.

No presente estudo, avalia-se a resistência à biocolonização e o desempenho à água de três argamassas térmicas aplicadas em sistemas multicamada de isolamento térmico pelo exterior. Tendo como objetivo a análise dos requisitos da EN 998-1 para a argamassa térmica e a avaliação e discussão do seu desempenho em sistema multicamada, avalia-se não só o desempenho do sistema como um todo, mas também da argamassa individualmente. A análise do desempenho à água foi realizada através de ensaios de absorção capilar, secagem e permeabilidade ao vapor de água. Para a avaliação da resistência à biocolonização considerou-se uma metodologia adaptada das normas americanas *ASTM D5590-17* [10] e *ASTM C1338-19* [11] e validada previamente pelos autores para ETICS [12]. Consideraram-se, ainda, duas condições de exposição: inoculação natural e inoculação artificial com uma suspensão mista de esporos de *Aspergillus niger* e *Penicillium funiculosum*.

2 | CAMPANHA EXPERIMENTAL

2.1. Materiais e sistemas

Neste trabalho, analisaram-se três argamassas térmicas (AT1, AT2, AT3) aplicadas em sistemas multicamada de isolamento térmico pelo exterior (S1, S2, S3), fornecidos por dois fabricantes distintos. Os provetes das diferentes soluções foram realizados pelos respetivos fabricantes. A constituição de cada uma das camadas dos diferentes sistemas (Figura 1) encontra-se especificada na Tabela 1. Uma vez que a espessura média de cada sistema ensaiado varia, a Tabela 1 apresenta, também, os dados da espessura (sistema completo e argamassa) de cada solução ensaiada. De referir, ainda, que os sistemas S1 e S2 (Figura 1), bem como as respetivas argamassas térmicas, encontram-se disponíveis no mercado e, por isso, possuem ficha técnica de produto. O sistema S3 ainda não se encontra no mercado, encontrando-se em fase de desenvolvimento. Na Tabela 2 apresentam-se algumas das propriedades das argamassas térmicas, disponíveis nas fichas técnicas ou em estudos prévios dos autores.

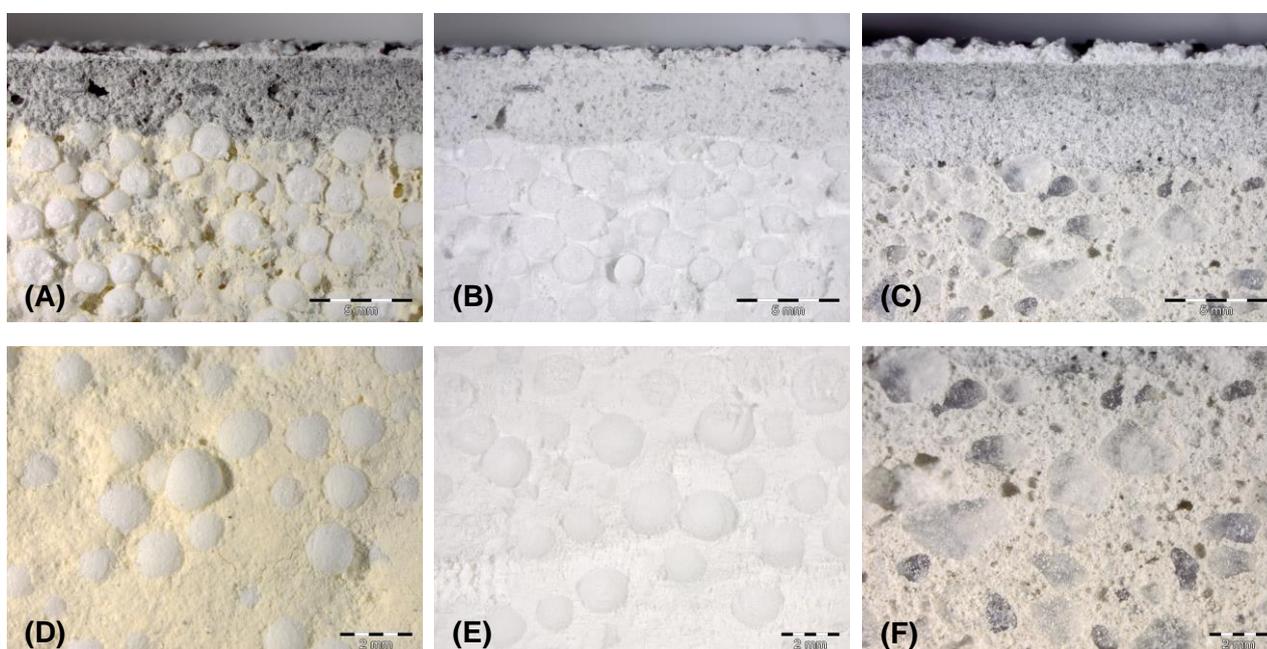


Figura 1. Sistemas multicamada ensaiados no estudo: (A) S1, (B) S2 e (C) S3 e respetivas argamassas térmicas (D-F).

Tabela 1. Identificação e constituição dos sistemas multicamada.

| Sistema (S) | Espessura do sistema [mm] | Argamassa térmica (Matriz/Agregado) | Espessura da argamassa [mm] | Camada de base* | Camada de acabamento |
|-------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|---------------------------------|----------------------|
| S1 | 68.73 | Cal/EPS | 60.28 | Cimento | Tinta acrílica 1 |
| S2 | 43.75 | Mista/EPS | 37.23 | Cimento, cal hidráulica natural | Tinta acrílica 2 |
| S3 | 55.33 | Mista/Aerogel | 40.50 | Cimento | Tinta acrílica 1 |

*Com inclusão de rede de fibra de vidro normal ou reforçada.

Tabela 2. Propriedades das argamassas térmicas avaliadas no estudo (sem camadas de proteção).

| Argamassa térmica | Massa volúmica [kg/m ³] | Coefficiente de capilaridade [kg/(m ² .min ^{0,5})] | Fator de resistência à difusão [-] | Aderência ao suporte [MPa] | Resistência à compressão [MPa] | Condutibilidade térmica [W/(m.K)] |
|-------------------|-------------------------------------|---|------------------------------------|----------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|
| AT1 | 150 ± 50 | 0,4 | ≤ 5 | > 0,08 | 0,4 – 2,5 | 0,042 |
| AT2 | 350 ± 50 | < 0,2 | ≤ 5 | 0,10 | CS I | 0.070 |
| AT3 | 160 ± 10 | 1,0 | 14,8 | 0,061 | 0,201 | 0,029 |

Nota: os dados de AT1 e AT2 foram obtidos das fichas técnicas dos produtos. Os dados de AT3 foram obtidos de [13].

2.2. Métodos de ensaio

O ensaio de absorção de água por capilaridade foi realizado de acordo com o especificado no EAD 040083-00-0404 [14] e na norma EN 998-1 [4]. Para testar o sistema completo, utilizaram-se provetes com uma área aproximada de 150 × 150 mm². Para testar as argamassas individualmente, utilizaram-se provetes com uma área aproximada de 40 × 40 mm². O ensaio foi realizado em ambiente condicionado, com uma temperatura (T) de 23 ± 2 °C e uma humidade relativa (HR) de 65 ± 5%. Antes da realização do ensaio, tanto os sistemas como as argamassas foram condicionados nas condições anteriormente mencionadas durante sete dias e as faces laterais foram seladas com fita cola ou cera. No caso do sistema completo, o coeficiente de absorção de água por capilaridade (Cc) foi obtido através do declive da reta inicial no gráfico que expressa a quantidade de água absorvida em função da raiz quadrada do tempo (3 min). No caso das argamassas, este valor foi obtido de acordo com o especificado na norma EN 1015-18 [15].

O ensaio de secagem foi realizado de acordo com o especificado na norma EN 16322 [16], em ambiente condicionado, com T = 23 ± 2 °C e HR = 65 ± 5% até se obter uma variação de massa constante para todos os provetes ensaiados. Com base nas curvas de secagem, expressas pela variação de massa em função do tempo de ensaio, é possível obter-se as taxas de secagem 1 e 2 (TS1 e TS2). A TS1 obtém-se através do declive inicial da curva de secagem correspondente à fase 1, representada pela desadsorção de água (kg/m²) em função do tempo (min). A TS2 obtém-se através do declive da fase intermédia da curva de secagem, correspondente à fase 2, representada pela desadsorção de água (kg/m²) em função da raiz quadrada do tempo (min^{1/2}). Ambos os declives (TS1 e TS2) são obtidos com base numa regressão linear.

O ensaio de permeabilidade ao vapor de água foi realizado de acordo com o EAD 040083-00-0404 [14], utilizando-se o método da cápsula seca, que implica o uso de um dessecante por forma a impulsionar o fluxo de vapor de água do exterior para o interior da cápsula. O dessecante garante uma HR de 0% no interior da cápsula. O ensaio foi realizado em ambiente condicionado com T = 23 ± 2 °C e HR = 50 ± 5%.

A suscetibilidade dos diferentes sistemas e argamassas térmicas ao desenvolvimento de bolores foi avaliada de acordo com uma metodologia adaptada das normas americanas *ASTM D5590-17* [10] e *ASTM C1338-19* [11] e validada previamente pelos autores para ETICS [12]. Para a realização do ensaio, utilizaram-se três provetes de cada um dos sistemas e respetivas argamassas térmicas, que foram expostos em frascos previamente esterilizados contendo meio de cultura adequado (4% malte, 2% agar). Todos os provetes possuem dimensões aproximadas de 40 mm × 40 mm × espessura do material. Utilizaram-se, também, três provetes de madeira (*Pinus pinaster*), que serviram como controlo e permitiram a validação do ensaio [11]. Consideraram-se, ainda, duas condições de exposição: inoculação natural (expostos sem esterilização prévia) e inoculação artificial (após esterilização por vapor de água) com uma suspensão mista de esporos de *Aspergillus niger* e *Penicillium funiculosum*.

Os frascos de cultura mantiveram-se em ambiente controlado (T = 22 ± 1 °C; HR = 70 ± 5%) por um período de quatro semanas. Efetuou-se uma classificação visual do grau de crescimento de bolores uma vez por semana de acordo com a escala definida na norma *ASTM D5590-17* [10]: 0 – sem crescimento aparente de bolores (0% de crescimento na superfície dos provetes); 1 – traços de crescimento (< 10% de crescimento na superfície dos provetes); 2 – crescimento leve (entre 10 a 30% de crescimento na superfície dos provetes); 3 – crescimento moderado (entre 30 e 60% de

crescimento na superfície dos provetes); 4 – crescimento considerável (> 60% de crescimento na superfície dos provetes). Após quatro semanas de incubação, os provetes foram removidos do interior dos frascos e classificados visualmente e com recurso a um microscópio estereoscópico Olympus B061.

3 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

3.1. Absorção de água por capilaridade e secagem

Nas Figuras 2 e 3 e na Tabela 3 apresentam-se as curvas de absorção de água por capilaridade e os valores médios de absorção capilar e do coeficiente de capilaridade para os sistemas completos e respetivas argamassas. Pela análise da Figura 2, verifica-se uma maior absorção capilar no caso das argamassas testadas individualmente, como era expectável. De facto, as camadas de revestimento têm um papel fundamental na proteção da argamassa térmica e na redução da absorção de água por capilaridade do sistema completo [13].

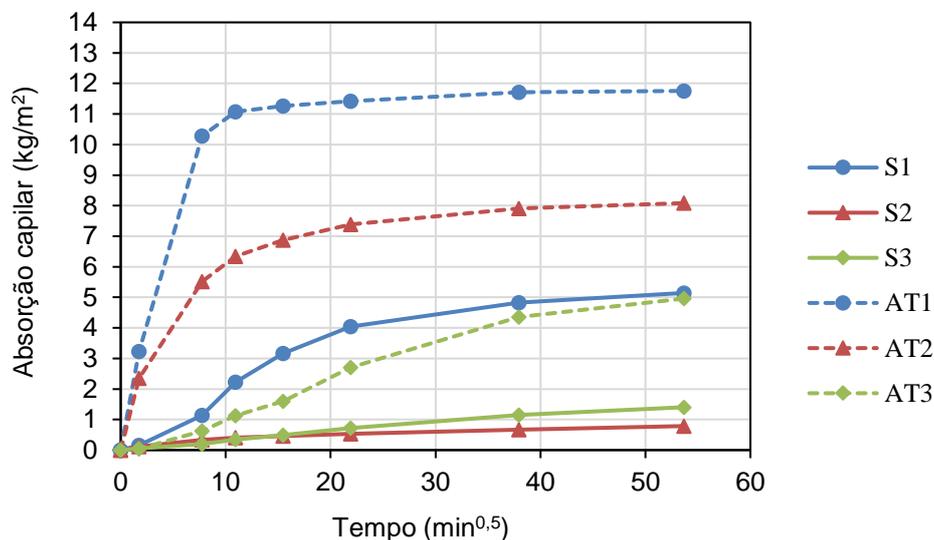


Figura 2. Curvas de absorção de água por capilaridade.

No caso dos sistemas multicamada, os maiores valores de absorção de água por capilaridade verificam-se para S1 (argamassa térmica de cal e EPS, com uma argamassa de cimento na camada de base e acabamento acrílico), seguido do sistema S3 (argamassa térmica à base de cimento e aerogel, com uma argamassa de cimento na camada de base e acabamento acrílico) e de S2 (argamassa térmica com cimento, cal e EPS, com uma argamassa de cimento e cal hidráulica natural na camada de base e acabamento acrílico). De facto, se se considerar os valores de absorção capilar após 1 h de ensaio, os valores obtidos por S2 são ligeiramente superiores aos de S3, o que não se verifica após 24 h de absorção de água por capilaridade. Este comportamento pode ser explicado pelo facto de S2 apresentar uma argamassa com cimento e cal hidráulica natural na camada de base, que acaba por absorver mais água que a argamassa de cimento dos sistemas S1 ou S3 (Tabela 1). Tratando-se de sistemas multicamada, os primeiros registos do ensaio (valores de Cc ou até da absorção capilar após 1 h) traduzem essencialmente o comportamento das camadas de revestimento, que neste caso é melhor para S3 (menor valor de Cc (Figura 3) e de absorção capilar após 1 h (Tabela 3)). Quando se observam os registos após 24 h de ensaio, é importante também considerar o comportamento da argamassa térmica, uma vez que a água absorvida pelo sistema pode já ter atingido a argamassa, condicionando o seu desempenho térmico.

A argamassa térmica de cal com EPS obteve não só o maior valor do coeficiente de capilaridade (0,472 kg/(m².min^{0,5})), mas também os maiores registos de absorção capilar ao longo de todo o ensaio, contabilizando 11,713 kg/m² de água

absorvida após 24 h de ensaio. Por outro lado, os menores valores foram obtidos para a argamassa de aerogel ($C_c = 0,152 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$), o que pode ser explicado pelas suas propriedades hidrófobas [17]. No entanto, é interessante notar que o sistema multicamada com a argamassa de aerogel (S3) não foi o que apresentou o melhor desempenho à água considerando as curvas de absorção (Figura 2), apesar de ter obtido o menor valor de C_c (água absorvida no início do ensaio) e de a argamassa de aerogel ter também exibido o melhor desempenho à água quando testada individualmente. Este comportamento pode ser explicado por alguma falta de compatibilidade entre a argamassa de aerogel e as camadas subsequentes, sendo esta uma questão já identificada anteriormente, mas que ainda não foi totalmente investigada [18].

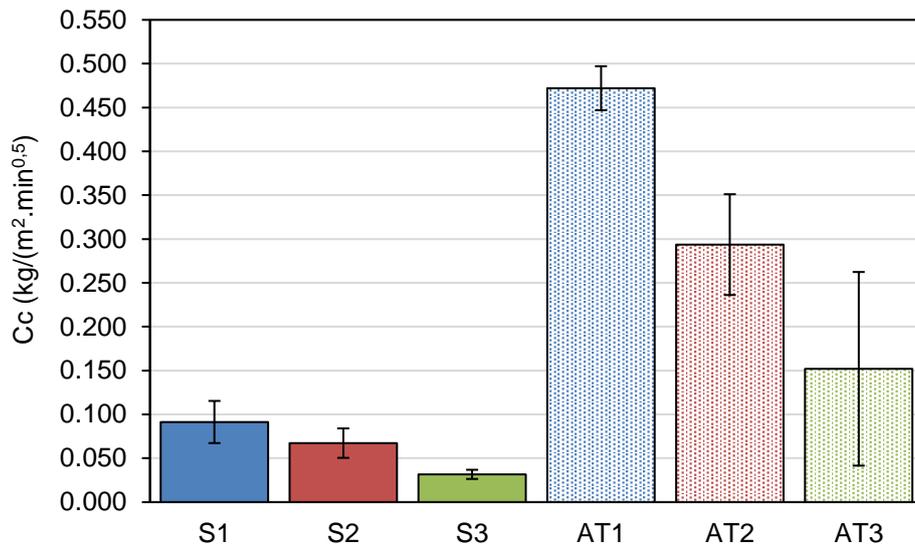


Figura 3. Valores médios do coeficiente de absorção de água por capilaridade.

Tabela 3. Resultados da absorção de água por capilaridade e secagem.

| | S1 | S2 | S3 | AT1 | AT2 | AT3 |
|--|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| Absorção capilar após 1 h [kg/m²] | 1,135 ± 0,580 | 0,329 ± 0,099 | 0,199 ± 0,053 | 10,278 ± 1,294 | 5,513 ± 0,143 | 0,623 ± 0,456 |
| Absorção capilar após 24 h [kg/m²] | 4,825 ± 1,442 | 0,671 ± 0,184 | 1,154 ± 0,410 | 11,713 ± 0,655 | 7,911 ± 0,687 | 4,360 ± 2,776 |
| C_c [kg/(m²·min^{0,5})] | 0,091 ± 0,024 | 0,067 ± 0,017 | 0,032 ± 0,05 | 0,472 ± 0,025 | 0,294 ± 0,058 | 0,152 ± 0,110 |
| TS1 [kg/(m²·min)] | 0,000748 | 0,000304 | 0,000209 | 0,002489 | 0,001980 | 0,001482 |
| TS2 [kg/(m²·min^{0,5})] | 0,0387 | 0,0077 | 0,0120 | 0,11780 | 0,0306 | 0,0427 |

Notas: C_c – coeficiente de absorção de água por capilaridade; TS1 – taxa de secagem 1; TS2 – taxa de secagem 2.

Na Figura 4 apresentam-se as curvas de secagem para os sistemas e argamassas. Os resultados das taxas de secagem 1 e 2 encontram-se na Tabela 3. Através da análise dos resultados, conclui-se que os valores das taxas de secagem são superiores no caso das argamassas térmicas testadas individualmente, o que está de acordo com os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade, ou seja, argamassas ou sistemas que apresentam maior absorção de água, também acabam por secar mais rapidamente.

No que diz respeito às argamassas térmicas, o maior valor de TS1 e de TS2 é obtido para AT1 (Tabela 3), o que indica que, de todas as argamassas, esta é a que apresenta maior transporte de água líquida até à superfície do provete (TS1), mas também maior difusão de vapor de água (TS2), em menor período de tempo.

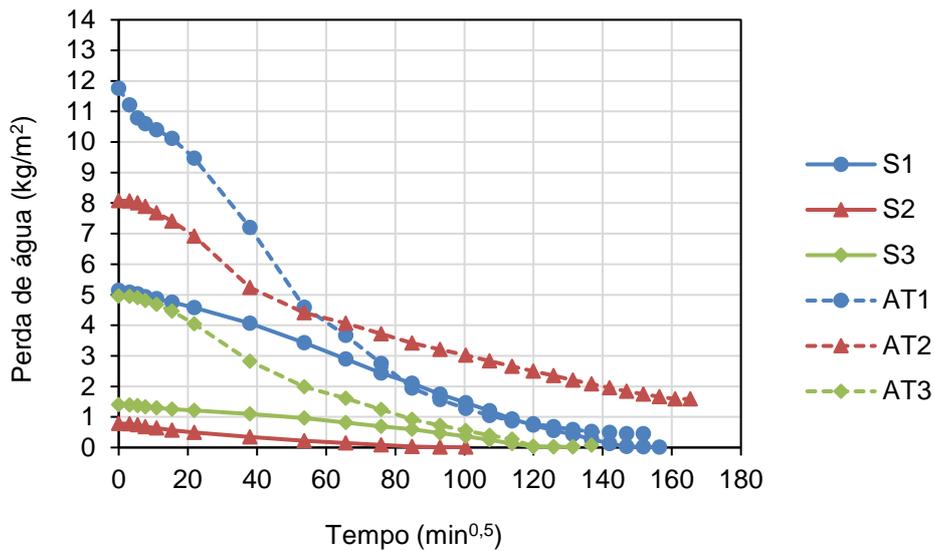


Figura 4. Curvas de secagem para os sistemas completos e argamassas térmicas.

3.2. Permeabilidade ao vapor de água

Na Figura 5 apresentam-se as curvas que representam a variação de massa em função do tempo de ensaio para os sistemas multicamada completos e para as argamassas térmicas. Os resultados da permeabilidade ao vapor de água encontram-se na Tabela 4. Os resultados obtidos indicam que os sistemas multicamada são entre 120% e 800% menos permeáveis ao vapor de água que as argamassas térmicas, sendo que o maior valor de resistência à difusão de vapor é obtido para o sistema S1 ($\mu = 54$) e o menor para S3 ($\mu = 11$). De facto, as camadas de revestimento contribuem fortemente para a redução da permeabilidade ao vapor do sistema completo. No entanto, todos os sistemas apresentam valores de espessura da camada de ar de difusão equivalente (S_d) inferiores a 1 kg/m^2 , sendo este valor definido pelo EAD [14] como o valor limite para as camadas de revestimento de sistemas ETICS.

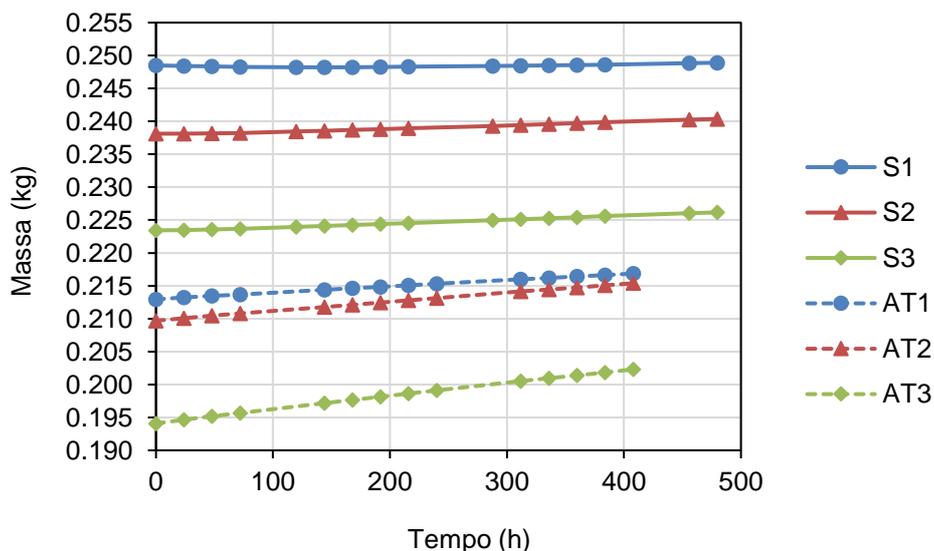


Figura 5. Curvas que representam a variação de massa em função do tempo de ensaio.

Em relação às argamassas térmicas avaliadas individualmente, a argamassa AT2 (matriz mista com EPS) obteve o maior valor do coeficiente de resistência à difusão do vapor de água ($\mu = 8$), seguida da argamassa AT1 (cal e EPS), com um μ

= 6 e, por fim, da argamassa de aerogel AT3 ($\mu = 5$). Os resultados obtidos estão de acordo com estudos anteriores onde se avaliaram argamassas com incorporação de EPS ($\mu < 9$) [3] ou de aerogel ($\mu = 4$) [19].

Tabela 4. Resultados da permeabilidade ao vapor de água.

| | S1 | S2 | S3 | AT1 | AT2 | AT3 | S1-AT1 | S2-AT2 | S3-AT3 |
|-----------|----|----|----|-----|-----|-----|--------|--------|--------|
| μ [-] | 54 | 26 | 11 | 6 | 8 | 5 | - | - | - |
| Sd [m] | - | - | - | - | - | - | 0,37 | 0,28 | 0,19 |

Notas: δ – permeabilidade ao vapor de água; μ - coeficiente de resistência à difusão do vapor de água; Sd – espessura da camada de ar de difusão equivalente.

3.3. Suscetibilidade ao desenvolvimento de bolores

Na Tabela 5 apresentam-se os resultados da classificação visual do grau de desenvolvimento de bolores na superfície das argamassas para cada uma das quatro semanas de ensaio. Em relação aos sistemas completos, o grau de desenvolvimento de bolores na superfície dos provetes foi sempre 0, desde a primeira à quarta semana de ensaio. Este último resultado pode ser explicado pela presença de um ou mais biocidas na composição da camada de acabamento que, na ausência de provas de envelhecimento e nas condições do ensaio, parece ser suficiente para controlar o desenvolvimento de bolores na superfície dos provetes. A atribuição da classificação 4 aos provetes de controlo logo desde a segunda semana de ensaio, bem como o desenvolvimento de bolores no meio de cultura e nas argamassas térmicas são indicadores de validação do ensaio.

Tabela 5. Resultados médios da classificação visual atribuída ao desenvolvimento de bolores na superfície dos provetes de argamassa.

| | Inoculação natural | | | | Inoculação artificial com <i>A. niger</i> e <i>P. funiculosus</i> | | | |
|----------|--------------------|-----------|-----------|-----------|---|-----------|-----------|-----------|
| | 1ª semana | 2ª semana | 3ª semana | 4ª semana | 1ª semana | 2ª semana | 3ª semana | 4ª semana |
| AT1 | 0 | 0,33 | 0,33 | 1 | 0 | 0 | 0,33 | 1 |
| AT2 | 0 | 0 | 0,33 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| AT3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,67 | 1 |
| Controlo | - | - | - | - | 3,67 | 4 | 4 | 4 |

Considerando a inoculação artificial com *A. niger* e *P. funiculosus*, os resultados indicam traços de crescimento de bolores (< 10% de crescimento na superfície dos provetes) nas argamassas AT1 e AT3 a partir da terceira semana de ensaio, com aparente maior predominância do *A. niger* (Figura 6B). Não se detetou qualquer crescimento aparente de bolores na superfície dos três provetes de argamassa AT2 inoculados artificialmente.

Em relação aos provetes com inoculo natural, detetaram-se traços de crescimento de bolores na superfície das argamassas AT1 (Figura 6A) e AT2 a partir da segunda e terceira semanas de ensaio, respetivamente. No entanto, o grau de desenvolvimento de bolores foi semelhante para as duas argamassas após quatro semanas de ensaio. Não se verificou crescimento aparente de bolores nos provetes de argamassa de aerogel (AT3).

No geral, considerando a inoculação natural e artificial, os resultados do desenvolvimento de bolores nas argamassas térmicas são inferiores aos obtidos para placas de aglomerado de cortiça expandida (ICB) e semelhantes aos obtidos para placas de lã mineral (MW) [20]. No entanto, são superiores ao desenvolvimento de bolores em placas de poliestireno expandido (EPS).

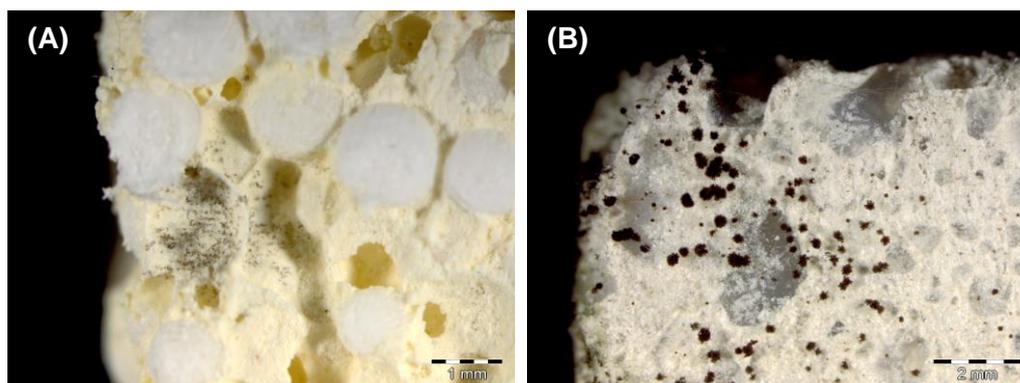


Figura 6. Imagens ao microscópio estereoscópico de um provete de AT1 (A) e de AT3 (B), ambos com colonização biológica após quatro semanas de ensaio.

3.4. EN 998-1 vs EAD 040083-00-0404

Na Tabela 6 apresentam-se os requisitos especificados na norma EN 998-1 [4] e no EAD [14] para a avaliação da absorção de água por capilaridade e da permeabilidade ao vapor de água dos sistemas completos e das argamassas térmicas. No entanto, importa referir que o EAD 040083-00-0404 [14] apresenta requisitos e métodos de ensaio para a avaliação de sistemas compósitos de isolamento térmico pelo exterior com revestimento sobre isolante do tipo ETICS. Uma vez que ainda não existe qualquer documento que permita avaliar o desempenho de sistemas multicamada de isolamento térmico pelo exterior com incorporação de argamassas térmicas, os requisitos especificados no EAD [14] foram utilizados no presente estudo para a avaliação do sistema completo, como primeira aproximação.

Tabela 6. Requisitos para a avaliação do sistema completo e das argamassas térmicas de acordo com o EAD [14] e a EN 998-1 [4], respetivamente.

| Requisitos | | S1 | S2 | S3 | AT1 | AT2 | AT3 |
|-----------------------------------|---|----|----|----|-----|-----|-----|
| Absorção de água por capilaridade | EN 998-1: $C_c \leq 0,40 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{min}^{0,5})$ | - | - | - | X | √ | √ |
| | EAD: $A_{1h} \leq 1 \text{ kg/m}^2$ | X | √ | √ | - | - | - |
| Permeabilidade ao vapor de água | EN 998-1: $\mu \leq 15$ | - | - | - | √ | √ | √ |
| | EAD: $S_d \leq 1 \text{ m}$ | √ | √ | √ | - | - | - |

Notas: C_c – coeficiente de capilaridade; A_{1h} – absorção capilar após 1 h; μ - coeficiente de resistência à difusão do vapor de água; S_d – espessura da camada de ar de difusão equivalente; √ - verifica; X – não verifica.

Os resultados da Tabela 6 indicam que as argamassas térmicas AT2 (matriz mista com EPS) e AT3 (matriz mista e aerogel) cumprem os requisitos da norma EN 998-1 [4] em relação à absorção de água por capilaridade e à permeabilidade ao vapor de água. No entanto, os resultados obtidos no presente estudo são sempre superiores àqueles declarados pelos fabricantes nas fichas técnicas de produto (Tabela 7), no caso das argamassas AT1 e AT2, que se encontram disponíveis no mercado. Em relação à argamassa de aerogel (AT3), os resultados de capilaridade e de permeabilidade ao vapor são inferiores aos obtidos por Pedrosa *et al.* [13] para uma argamassa semelhante. Isto pode ser explicado pelo facto da argamassa aqui testada ter sido fornecida pelo respetivo fabricante no seu estado endurecido, enquanto em [13] foram os autores a fabricar as argamassas em laboratório.

Em relação à avaliação dos sistemas completos de acordo com os requisitos do guia europeu EAD [14], verifica-se uma tendência semelhante, ou seja, todos os sistemas cumprem os requisitos com exceção de S1 no valor da absorção de água por capilaridade após 1 h de ensaio. Os resultados obtidos demonstram, assim, a importância de um bom desempenho de todos os componentes do sistema para um aumento da eficiência e da durabilidade do conjunto.

Tabela 7. Comparação entre valores declarados nas fichas técnicas de produto ou em estudos anteriores [13] e aqueles obtidos no presente estudo.

| Argamassas térmicas (AT) | Absorção de água por capilaridade – Cc [kg/(m ² .min ^{0,5})] | | Permeabilidade ao vapor de água – μ [-] | |
|--------------------------|---|-----------------|---|-----------------|
| | Valores declarados | Valores medidos | Valores declarados | Valores medidos |
| AT1 | 0,4 | 0,472 | ≤ 5 | 6 |
| AT2 | < 0,2 | 0,294 | ≤ 5 | 8 |
| AT3 | 1,0* | 0,152 | 14,8* | 5 |

*Valores obtidos para argamassa semelhante no estudo de Pedroso *et al.* [13]

4| CONCLUSÕES

Com o presente estudo, pretendeu-se avaliar a resistência à colonização por bolores e o desempenho à água de três argamassas térmicas aplicadas em sistemas multicamada de isolamento térmico pelo exterior. Tendo como objetivo a análise dos requisitos da EN 998-1 para a argamassa térmica e a avaliação e discussão do seu desempenho em sistema multicamada, avaliou-se não só o desempenho do sistema como um todo, mas também da argamassa individualmente.

Os resultados obtidos sugerem um desempenho satisfatório à água para todas as soluções, com exceção do sistema S1 (argamassa térmica de cal e EPS, com uma argamassa de cimento na camada de base e acabamento acrílico) e da respetiva argamassa AT1. De facto, os resultados de absorção de água por capilaridade e de permeabilidade ao vapor de água obtidos para o sistema completo e para a argamassa superam os limites definidos no EAD [14] e na norma EN 998-1 [4], demonstrando a importância de um bom desempenho de todos os componentes do sistema e de uma boa compatibilidade entre eles para um aumento da eficiência e da durabilidade do conjunto. Adicionalmente, um estudo mais abrangente destes sistemas multicamada continua a ser necessário, assim como o desenvolvimento de um documento, com base em normalização e guias técnicos existentes, que permita avaliar o seu desempenho.

Em relação aos sistemas completos, o grau de desenvolvimento de bolores na superfície dos provetes foi sempre 0, desde a primeira à quarta semana de ensaio, o que pode ser explicado pela presença de um ou mais biocidas na composição da camada de acabamento que, na ausência de provas de envelhecimento e nas condições do ensaio, parece ser suficiente para controlar o desenvolvimento de bolores. No entanto, os resultados indicaram traços de crescimento de bolores (< 10% de crescimento na superfície dos provetes) nas argamassas AT1 e AT3 a partir da terceira semana de ensaio, no caso da inoculação artificial. Em relação aos provetes com inoculo natural, detetaram-se traços de crescimento de bolores na superfície das argamassas AT1 e AT2 a partir da segunda e terceira semanas de ensaio, respetivamente. Não se detetou qualquer crescimento aparente de bolores na superfície dos três provetes de argamassa AT2 inoculados artificialmente, nem nos provetes de argamassa de aerogel (AT3) com inoculo natural. Os resultados demonstram, uma vez mais, a importância de um bom desempenho de todos os componentes do sistema para um aumento da durabilidade do conjunto. Neste caso, o bom desempenho das camadas de revestimento é essencial para prevenir fenómenos de colonização biológica na argamassa térmica e, conseqüentemente, em todo o sistema.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT) pelo financiamento ao projeto WGB_Shield – Proteção de fachadas de edifícios na revitalização das cidades. Tripla resistência à água, ao graffiti e à biocolonização em sistemas de isolamento térmico pelo exterior (PTDC/ECI-EGC/30681/2017) e à bolsa de doutoramento FCT com a

referência DFA/BD/5180/2020. Agradece-se, também, às empresas Secil e Weber Saint-Gobain pelo fornecimento dos materiais utilizados na campanha experimental.

Referências

- [1] European Commission, 2016. "Mapping and analyses of the current and future (2020-2030) 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] Maia, J.; Ramos, N.M.M.; Veiga, R., 2018. "Evaluation of the hygrothermal properties of thermal rendering systems", *Building and Environment* 144, 437-449.
- [6] Soares, A.; Júlio, M.; Flores-Colen, I.; Ilharco, L.; de Brito, J.; Gaspar Martinho, J., 2014. "Resistência à água de argamassas com incorporação de agregados leves", Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 5 a 7 de março, Guimarães, Portugal.
- [7] Gonçalves, M.; Simões, N.; Serra, C.; Almeida, J.; Flores-Colen, I.; Vieira de Castro, N.; Duarte, L., 2021. "Onsite monitoring of ETICS comparing different exposure conditions and insulation properties", *Journal of Building Engineering* 42, 103067.
- [8] Barreira, E.; P. de Freitas, V., 2013. "Experimental study of the hygrothermal behaviour of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS)", *Building and Environment* 63, 31-39.
- [9] Parracha, J.L.; Borsoi, G.; Flores-Colen, I.; Veiga, R.; Nunes, L.; Dionísio, A.; Gomes, M.G.; Faria, P., 2021. "Performance parameters of ETICS: Correlating water resistance, bio-susceptibility and surface properties", *Construction and Building Materials* 272, 121956.
- [10] ASTM, 2017. "Determining the resistance of paint films and related coatings to fungal defacement by accelerated four-week agar plate assay", ASTM D5590-17, ASTM International, Pennsylvania, USA.
- [11] ASTM, 2019. "Standard test method for determining fungi resistance of insulation materials and facings", ASTM C1338-19, ASTM International, Pennsylvania, USA.
- [12] 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.
- [13] Pedroso, M.; Flores-Colen, I.; Silvestre, J.D.; Gomes, M.G.; Silva, L.; Ilharco, L., 2020. "Physical, mechanical, and microstructural characterisation of an innovative thermal insulating render incorporating silica aerogel", *Energy & Buildings* 211, 109793.
- [14] EOTA, 2020. "Guideline for European technical approval of External Thermal Insulation Composite Systems (ETICS) with Rendering", EAD 040083-00-0404, EOTA, Brussels, Belgium.
- [15] CEN, 2020. "Methods of test for mortar for masonry. Part 18: determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar", EN 1015-18, European Standard, Brussels, Belgium.

- [16] CEN, 2013. "Conservation of cultural heritage – Test methods – Determination of drying properties", EN 16322, European Standard, Brussels, Belgium.
- [17] Ibrahim, M.; Biwole, P.H.; Wurtz, E.; Achard, P., 2014. "A study on the thermal performance of exterior walls covered with a recently patented silica-aerogel-based insulating coating", *Building and Environment* 81, 112-122.
- [18] Karim, A.N.; Johansson, P.; Sasic, A.K., 2022. "Knowledge gaps regarding the hygrothermal and long-term performance of aerogel-based coating mortars", *Construction and Building Materials* 314, 125602.
- [19] Stahl, T.; Brunner, S.; Zimmermann, M.; Wakili, K.G., 2012. "Thermo-hygric properties of a newly developed aerogel based insulation rendering for both exterior and interior applications", *Energy & Buildings* 44, 114-117.
- [20] Parracha, J.L.; Cortay, A.; Borsoi, G.; Veiga, R.; Nunes, L., 2020. "Evaluation of ETICS characteristics that affect surface mould development", XV International Conference on Durability of Building Materials and Components, 20 a 23 de outubro, Barcelona, Espanha.