

Estudo experimental do fluxo de umidade em argamassas de cal aérea

Experimental study on the humidity in aerial lime mortar

Mateus Antônio Nogueira Oliveira¹, Miguel Azenha²,
Paulo Barbosa Lourenço², Anna Meneghini²,
Erika Guimarães²

¹ Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.

e-mail: mateusengcivil@gmail.com

² ISISE – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Minho, Guimarães, Portugal.

e-mail: miguel.azenha@civil.uminho.pt, meneanna@gmail.com, erikaguimaraes@poli.ufrrj.br

RESUMO

Uma parte significativa do património histórico construído ao redor do mundo é constituída de alvenaria estrutural, com juntas preenchidas com argamassa. Nesses sistemas estruturais, a argamassa usualmente representa uma parcela pequena/moderada do volume total da estrutura, no entanto, a argamassa é reconhecida como a principal fonte de movimentos/deformações, dessa forma, justifica-se a necessidade de um melhor conhecimento do comportamento. Na fabricação de argamassas antigas, a cal aérea é um dos ligantes mais recorrentes. Nessas argamassas, o endurecimento do material é gradual a partir da superfície, em correspondência com os processos de carbonatação e secagem. Os dois processos citados condicionam diversas propriedades do material. Para argamassas de cal aérea, o estudo da carbonatação é difundido na literatura, porém para o fluxo de umidade, o número de estudo ainda é reduzido. Durante a fabricação da argamassa parte da água utilizada é evaporada pela reação de hidratação. Todavia, permanece no material um alto teor de umidade. No presente trabalho, são descritos estudos realizados para compreensão dos fluxos internos de umidade nessas argamassas. A campanha experimental, inicia-se com a caracterização dos materiais, bem como a definição da composição/traço da argamassa. Os corpos-de-prova foram armazenados em ambiente controlado, dentro de uma câmara climática, sendo que os mesmos possuem geometrias que simulam condições de fluxos uniaxial (1D) e axissimétricos. Foi efetuada a monitorização da umidade interna dos corpos-de-prova em várias profundidades ao longo do tempo. Os resultados indicam um processo de difusão acelerado, com decréscimo rápido da umidade quando comparados com valores usuais observados em concretos ou argamassas à base de cimento.

Palavras-chave: Cal aérea, Argamassa, Construções históricas, Análise experimental, Umidade.

ABSTRACT

A significant part of the historical heritage around the world consists of masonry structures, with joints filled with mortar. In these structural systems, mortar usually represents a small/moderate portion of the total volume of the structure. However, the mortar is recognized as the main source of deformations/displacement in the structure, this fact justifies the necessity of an appropriated knowledge of its behavior. In ancient mortars, aerial lime is one of the earliest and recurring binders around the world. In these mortars, the hardening of the material is gradual from the surface, in correspondence with the carbonation and drying processes. For these mortars, these two cited processes affect various properties of the material. For aerial lime mortars, the study of carbonation is widespread in the literature, diverse authors already study the topic. However, for the moisture diffusion processes, the number of studies is still quite reduced. During the mortar preparation, some of the water applied during the mixing is evaporated by the exothermic reaction of hydration. However, an elevated moisture content remains. In this work, studies are carried out to investigate the internal humidity fluxes in aerial lime mortars. The experimental program begins with the characterization of the materials, as well as the definition of the

mortar composition. Experimental work was carried out on specimens stored in a controlled environment, with geometries simulating uniaxial and axisymmetric flows. The monitoring of internal moisture of specimens at various depths was carried out. The results indicated an accelerated diffusion, with a rapid decrease of humidity when compared with usual values observed in cement-based materials

Keywords: Aerial lime; Mortar; Historical buildings; Experimental analysis; Humidity.

1. INTRODUÇÃO

Diferentes estruturas históricas em alvenaria possuem importantes aspectos culturais, sociais, arqueológicos, estéticos, econômicos, políticos, arquitetônicos e técnicos que devem ser considerados [1, 2]. Nesse sentido, a preservação de construções históricas é de grande importância para a sociedade atual bem como para as gerações futuras [1, 2].

Uma análise estrutural detalhada de estruturas antigas em alvenaria exige cuidado especial, considerando-se explicitamente as propriedades da argamassa [2,3]. De fato, apesar da argamassa corresponder a uma pequena ou moderada parcela do volume da estrutura [4], a mesma é reconhecida como a principal componente, responsável por deformações estruturais [2]. Argamassas à base de cal aérea foram utilizadas em diversas partes do mundo, inclusive no Brasil [2]. Para essas argamassas o processo de carbonatação é de fundamental importância para o ganho de resistência [2, 5-10]. Vários parâmetros ambientais influenciam o processo de carbonatação, como temperatura, umidade relativa e concentração de dióxido de carbono [11, 12]. Outro fator essencial no estudo desse tipo de material é o processo de secagem. Com relação a esse fenômeno, vários autores já mediram a difusão da umidade em materiais à base de cimento [13-17]. Para argamassas históricas, poucos resultados podem ser encontrados em outras literaturas [7, 18].

Considerando-se o mencionado, a umidade afeta diferentes propriedades da argamassa, como o comportamento mecânico [2, 19], a carbonatação e outros fenômenos [20, 21]. Portanto, se faz essencial a análise da secagem, e a compreensão dos fluxos internos de umidade em argamassas de cal aérea para uma detalhada modelagem multi-física do material e da estrutura.

No tocante ao campo mecânico, a umidade possui influência não apenas no desenvolvimento e ganho de resistência e da rigidez, bem como em fenômenos como retração e fluência [2,3,9], sendo fator fundamental no comportamento estrutural do material [20, 21].

Diferentes pesquisadores demonstraram a influência da umidade no processo de carbonatação [2, 3]. Para níveis de umidade acima de 40%, poros com raio menor 0.4nm tornam-se bloqueados [2,3], e acima 90%, os macroporos de maiores diâmetros estão completamente bloqueados [2, 3, 9, 11]. Diferentes referências citam o processo de carbonatação sendo mais rápido em uma faixa umidade relativa, todavia não há um consenso sobre os valores [2, 3].

Para uma análise detalhada do campo de umidade, torna-se essencial o conhecimento do perfil de umidade ao longo do tempo [22], bem como a redução pela auto-dissecação do material, que corresponde ao fenômeno associado a redução da umidade pelo consumo próprio do material [2, 7, 22]. A estratégia adotada neste trabalho pretende investigar a difusão de umidade na argamassa de cal aérea nas idades iniciais, ou seja, durante o processo de endurecimento primário do material, uma vez que o endurecimento completo da argamassa pode demandar longas idades [6, 7, 23]. O programa experimental inicia-se com a caracterização dos materiais, bem como a definição da composição, seguida de uma avaliação experimental pioneira da distribuição de umidade interna com tubos de medição embutidas no material.

Com o objetivo de se estudar experimentalmente o fluxo em condições 1D, um CP prismático foi utilizado, sendo que o mesmo possuía todas as faces seladas com exceção de uma. O mesmo molde plástico foi também adotado para o estudo da auto-dissecação, nesse caso todas as faces estavam seladas. Em continuidade, no estudo do perfil de umidade cilindros (condição axissimétrica) com tubos para medição posicionadas vertical e horizontalmente foram também estudados, juntamente com corpos-de-prova (CP's) completamente selados.

Considerando-se a importância do tema para o estudo do material, o acoplamento do mesmo com os demais campos de estudo, bem como a escassez de estudos da evolução do perfil de umidade em argamassas de cal aérea, o presente trabalho procede o estudo do fluxo de umidade em argamassas de cal aérea. No final do trabalho, as principais conclusões são apresentadas.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Nessa seção, detalhes sobre os componentes a composição e o modo de preparo e armazenamento

utilizados nesse trabalho são apresentados.

No que tange aos componentes, a cal viva micronizada foi adotada como aglutinante [2]. A cal utilizada está classificada como CL90 Q [2, 5-7], proveniente de calcário calcítico, também denominada de cal virgem/viva cálcica. Para caracterizar o material e também atestar essa condição, o material foi analisado por espectroscopia de fluorescência de raios-X (XRF). Os resultados da XRF revelaram a presença de 97,2% de CaO, seguido por SO₃ (1,32%) e em menor quantidade o MgO (1,05%), outros elementos menores frações também foram detectados [2].

No tocante ao agregado, areia proveniente de rio da região norte de Portugal foi adotada, o material é basicamente composto por sílica (~98%) (resultado obtido pelo ensaio de fluorescência de raios-x) [2], a curva granulométrica do agregado pode ser visualizada na Figura 1.

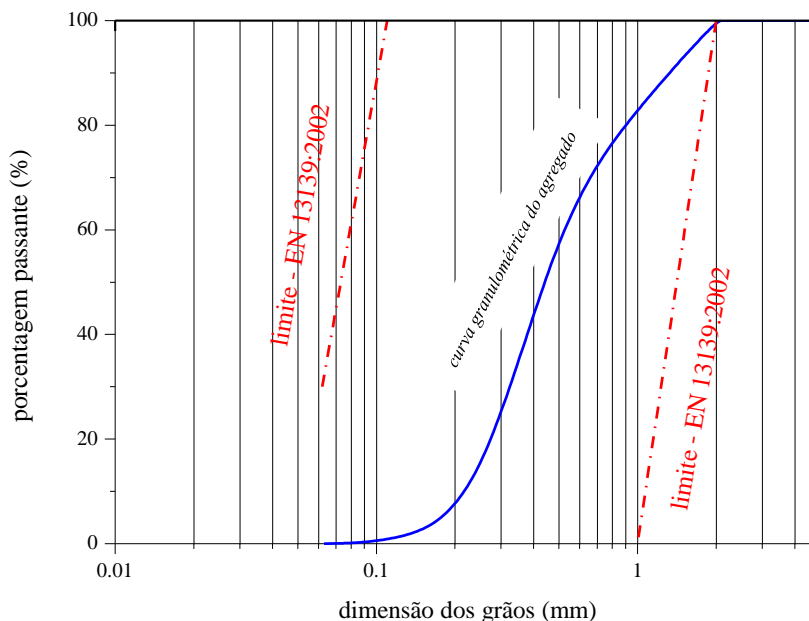


Figura 1: Curva granulométrica

Os materiais apresentaram os seguintes valores para densidade aparente (massa dividida pelo volume total): cal $\approx 0,85 \text{ g/cm}^3$ e areia $\approx 1,74 \text{ g/cm}^3$.

Apresenta-se a seguir informações sobre a composição e produção da argamassa. A mistura selecionada possui as proporções em termos de volume 1:3:1,3 (cal:areia:água). A definição da mistura envolveu um processo iterativo atentando-se para a representatividade, a trabalhabilidade e a presença de fissura [2].

O método de mistura adotado foi o “*hot-lime mix*” [2, 6, 7], em coerência com vários trabalhos de investigação anteriores e também com a estratégia citada na literatura para construções históricas [2, 24-31]. O processo de mistura foi feito de acordo com as recomendações da norma EN 196-1 [32], e seguiu a adição dos componentes na seguinte ordem: agregados (mistura de areias grossa e fina), cal e água [25, 28].

Os CP’s foram armazenados num ambiente controlado (dentro de uma câmara climática localizada na Universidade do Minho, na cidade de Guimarães, Portugal) desde a moldagem e por toda a duração dos ensaios. A câmara climática foi utilizada uma vez que possuía umidade relativa e temperatura controladas, 60% e 20°C, respectivamente [2, 6, 7, 33].

A descrição dos corpos-de-prova de acordo com a geometria está apresentada a seguir, duas configurações principais foram adotadas:

- corpos-de-prova prismáticos (exposto+selados).
- corpos-de-prova cilíndricos (expostos+selado).

2.1 Corpos-de-prova Prismáticos

Nesta parte do trabalho, são fornecidas informações sobre os CP’s prismáticos para os ensaios que visam

simular o fluxo unidirecional (1D) e a auto-dissecação. Um molde prismático transparente, esquematicamente mostrado na Figura 2 foi adotado, para que fosse possível visualizar possíveis fissuras na argamassa. O recipiente possui três furos, perfurados através da sua superfície inferior, nos quais, posteriormente os tubos de umidade foram introduzidos. O molde apresenta as seguintes dimensões: 5,3 cm de altura, 5,0 cm de espessura e 17,8 cm de comprimento, como pode ser visto na Figura 2.

Os tubos de material plástico para medição da umidade foram introduzidos em três profundidades distintas de medição. A posição das tubos visa não perturbar o percurso da umidade entre a superfície e o ponto de medição, uma vez que as mesmas são introduzidas do lado oposto da superfície de evaporação, como pode ser visualizado na secção A-A da Figura 2.

As partes inferiores das tubos em contato com a amostra foram vedadas por uma membrana especial, denominada de GORE-TEX® [34], fixada por cola quente (ver Figura 2). Outros autores também citam o uso dessa técnica em medições de umidade nos materiais à base de cimento, como argamassas e concretos [35-37]. Uma visão do molde prismático adotado e suas dimensões utilizadas é apresentada com mais detalhes na Figura 2.

Em continuidade, uma camada de parafina foi aplicada na margem de contato entre a argamassa e o recipiente de plástico (ver Figura 2). Este procedimento foi adotado para minimizar o efeito da retração da argamassa, o que poderia criar um caminho preferencial para o fluxo da umidade na região de contato entre os dois materiais (ver Figura 2).

Três corpos-de-prova prismáticos foram moldados (*HM.A*, *HM.B* e *HM.C*). Um corpo-de-prova (*HM.A*) foi adotado para simular o fluxo 1D, e os outros dois (*HM.B* e *HM.C*) foram adotados para investigar o comportamento sob condições seladas. Para os moldes selados, o processo de vedação foi feito com plástico de embalagem fechada, cola quente e fita plástica para auxiliar o isolamento. Os CP's selados também foram moldados com três tubos para medição de umidade interna. Em relação as condições de cura, o corpo-de-prova *HM.A* foi exposto desde a modelagem.

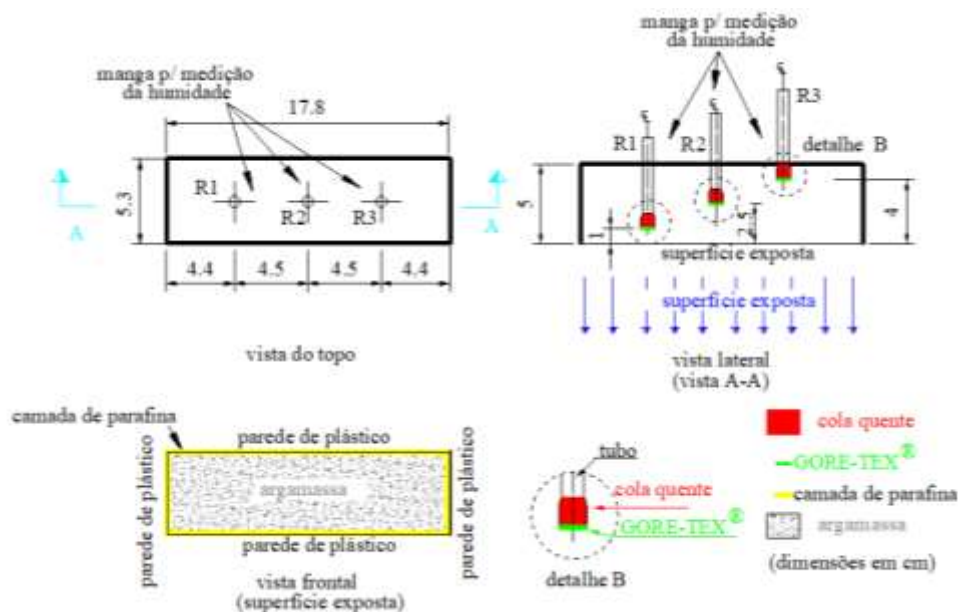


Figura 2: Molde uniaxial a) Posição dos tubos para medição da umidade vista do topo; b) Profundidade dos tubos para medição da umidade - vista lateral; c) Vista frontal da superfície exposta.

Um resumo contendo informações sobre os CP's prismáticos utilizados nessa pesquisa pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1: Resumo dos CP's primáticos para testes de difusão e autodissecação de umidade.

AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO	FASES DO TESTE (DIAS)	CP's	CP
câmara padrão (60%, 20 °C)	contínuo	1+2 (1 exposto + 2 selado)	<i>HMA</i> (selado) <i>HM.B</i> (selado) <i>HMC</i> (exposto)

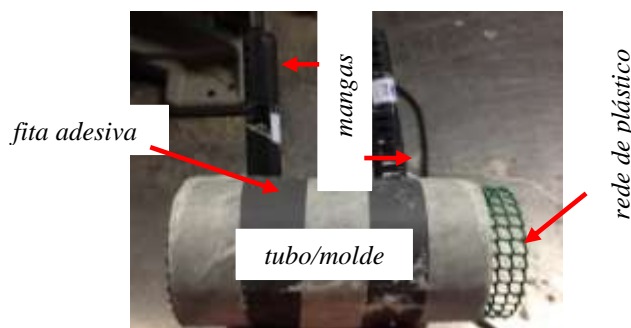
2.2 Corpos-de-prova Cilíndricos

Em continuidade com o estudo, nesta parte do trabalho apresenta-se informações sobre os CP's cilíndricos que foram adotados para estudar o fluxo de umidade, um resumo é apresentado na Tabela 2. Essa geometria foi intencionalmente adotada para reproduzir uma condição axissimétrica de fluxo, para tanto, camadas de parafina foram aplicadas, nas partes superior e inferior, para reduzir o fluxo de umidade através dessas regiões. Os cilindros apresentam diâmetro de ~6 cm e altura de ~12 cm (ver desde a Figura 3 a Figura 6). Foram confeccionados 3 cilindros (*H-H60-A*, *H-H60-B* e *H-H60-C*) nas condições supracitadas e outro com as mesmas dimensões, porém completamente selado (*H-H60-S*).

Tabela 2: Resumo de CP's cilíndricos para testes de difusão de umidade

AMBIENTE DE EXPOSIÇÃO	FASES DO TESTE (DIAS)	CP's	CP
câmara padrão (60%, 20 °C)	contínuo	3+1 (3 expostos + 1 selado)	<i>H-H60-A</i> (exposto) <i>H-H60-B</i> (exposto) <i>H-H60-C</i> (exposto) <i>H-H60-S</i> (selado)

Em relação ao molde, foi adotado um sistema com tubos de PVC e uma rede de plástico enrolada no interior do tubo de polipropileno (ver Figura 3 e Figura 4). A Figura 3 mostra que antes da moldagem, as duas metades do tubo de plástico estavam unidos por uma fita adesiva. Com o objetivo de manter a forma do tubo externo, a rede foi esticada e posicionada ao redor do diâmetro interno do tubo (ver Figura 3 e Figura 4). Os CP's foram então colocados nas câmaras climáticas e mantidos nesta condição por cerca de 5 horas (ver Figura 4).

**Figura 3:** Moldagem dos CP's cilíndricos (tubo/molde + rede plástica).

Após o período inicial, os CP's foram parcialmente desmoldados (ver Figura 4). A rede de plástico foi utilizada para fornecer o suporte para a argamassa de cal aérea na fase inicial, e as camadas de

parafina foram aplicadas na parte superior e na parte inferior do cilindro (ver Figura 4). Desta forma, a rede foi adotada durante as idades iniciais, para permitir o contato entre a argamassa e o ambiente (ver Figura 4). A rede de plástico foi removida após um período de 24 horas após a moldagem. Depois desse período, as superfícies laterais dos cilindros estavam completamente expostas às condições ambientais (ver Figura 4).

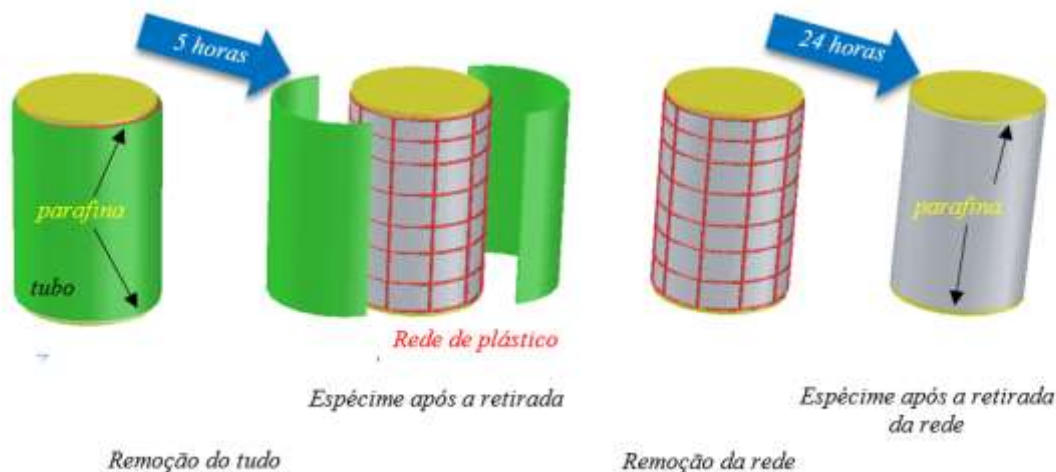


Figura 4: Moldagem dos CP's cilíndricos (tubo + rede plástica) - *H-H60-A*, *H-H60-B* e *H-H60-C*.

Em relação aos CP's utilizados para se estudar o processo de difusão em cilindros, foi adotado o mesmo procedimento para a elaboração apresentada na secção anterior (tubos + GORE-TEX® + cola quente). Em termos de configuração, duas configurações foram testadas, primeiro com os tubos de umidade na posição vertical (ver a Figura 5), e, em seguida, com os tubos inseridos horizontalmente (ver a Figura 6). Estas duas configurações (Figura 5 e Figura 6) foram testadas com o objetivo de verificar a consistência dos resultados e também verificar a possível influência da posição adotada para as tubos. Em resumo, foram analisados três cilindros: *H-H60-A*, *H-H60-B* e *H-H60-C* (ver a Tabela 3).

Tabela 3: Resumo dos corpos-de-prova cilíndricos.

NOME DOS CP's	CONFIGURAÇÃO DO TUBO/MANGA	POSICÕES DO TUBO DE MEDIÇÃO/MANGA	DETALHES
H-H60-A (fluxo assimétrico)	Inserido verticalmente	1,0 e 3,0 cm	Ver Figura 5
H-H60-B (fluxo assimétrico)	Inserido horizontalmente	1,3 e 3,0 cm	Ver Figura 6
H-H60-C (fluxo assimétrico)	Inserido horizontalmente	1,3 e 3,0 cm	Ver Figura 6

Considerando a informação já apresentada, detalha-se a configuração experimental para os corpos-de-prova cilíndricos para o primeiro espécime, a configuração adotada para *H-H60-A* pode ser vista na Figura 5. Dois tubos/mangas (*hp-vert-1* e *hp-vert-2*) foram inseridos verticalmente e as partes superior e inferior dos corpos-de-prova foram seladas com uma camada de parafina [2], de forma a garantir o fluxo em condições axissimétricas (ver Figura 5).

A configuração experimental final para *H-H60-B* e *H-H60-C* pode ser vista na Figura 6. Para esses corpos-de-prova, dois tubos de medição/mangas (*hp-hor-1* e *hp-hor-2*) foram inseridos horizontalmente, como pode ser visualizado na Figura 6. Para estes CP's, camadas de parafina foram colocadas perto da região externa do cilindro, onde as tubos foram inseridas na argamassa, com o objetivo de reduzir o possível escape de líquido, conforme indicado na Figura 6.

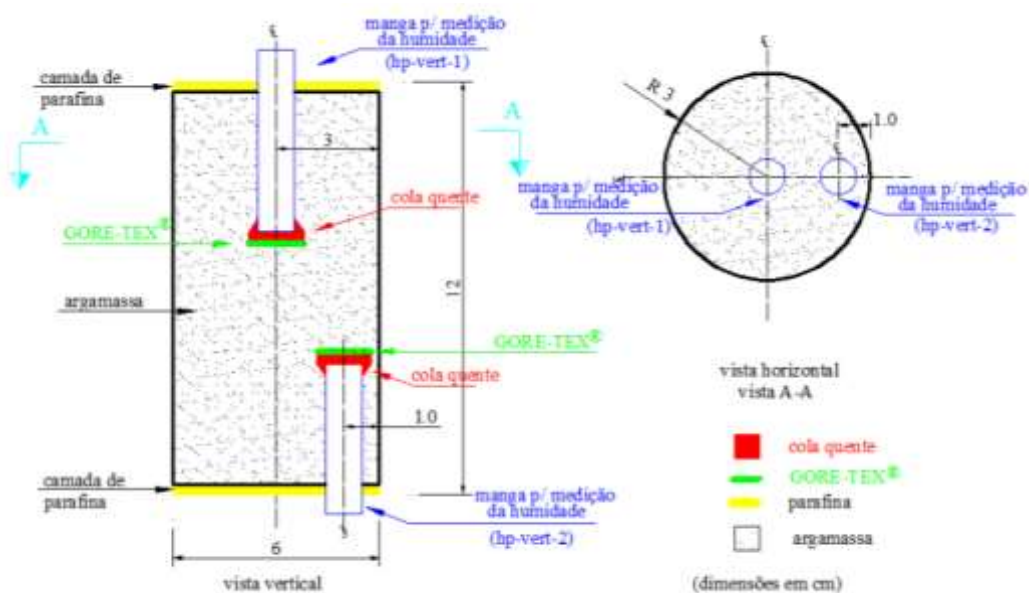


Figura 5: Corpo-de-prova cilíndrico – Tubos/mangas verticais para medição da umidade (H-H60-A)

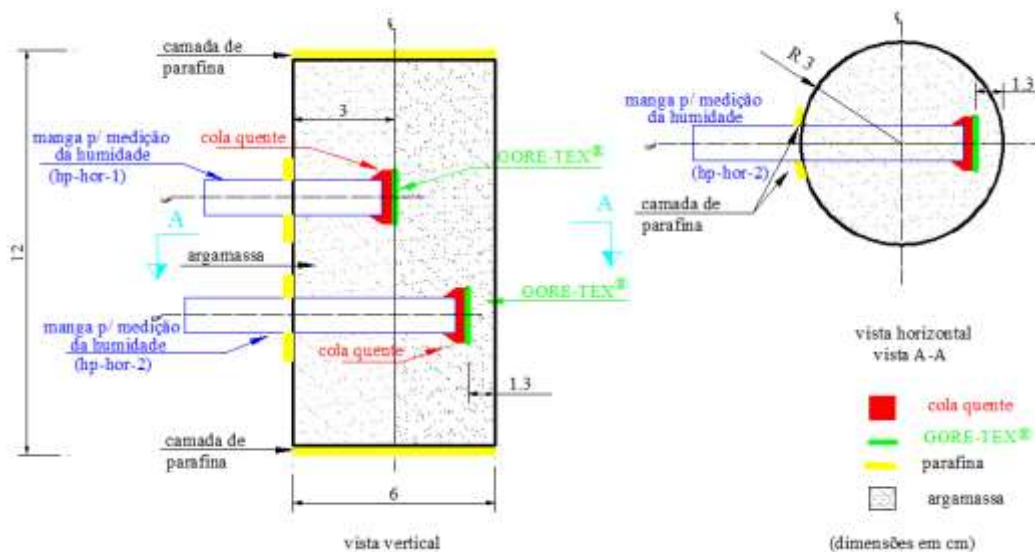


Figura 6: Corpo-de-prova cilíndrico – Tubos /mangas horizontais para medição da umidade (H-H60-B e H-H60-C)

As medições de umidade tanto para os CP's prismáticos quanto para os cilíndricos foram realizadas como um equipamento específico para tão estudo, o Vaisala *HMI41*. O sensor de umidade apresenta um erro de cerca de $\pm 3\%$; e para valores elevados de umidade ($\sim 95\%$), o erro é de aproximadamente $\pm 5\%$ [2].

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa seção, os principais resultados e as discussões centrais são apresentados. Para o estudo do fluxo de umidade em condições 1D, os resultados da amostra *HM.A*, para as três profundidades monitoradas são apresentados na Figura 7. Os valores medidos em diferentes profundidades a partir da superfície de evaporação (1 cm, 2,5 cm e 4 cm) mostram uma pequena diferença, especialmente após 30 dias. Os resultados para 2,5 cm e 4 cm foram semelhantes em todos os ensaios realizados. Esses resultados podem

ser associados a um valor de coeficiente de difusão elevado para este material, ou até mesmo erros/imprecisões relacionados ao dispositivo de medição. O sensor de umidade apresenta um erro de $\pm 3\%$ (para valores usuais de umidade), e para valores elevados de umidade relativa elevada ($>95\%$), o erro é de aproximadamente $\pm 5\%$ [38,39]. Os valores de umidade foram semelhantes ao valor de equilíbrio ($\sim 60\%$) com o ambiente após ~ 50 dias para as três profundidades estudadas (ver Figura 7).

O primeiro valor de umidade medido, ainda em uma idade inicial (~ 2 dias) foi de $\sim 93\%$, uma umidade mais alta seria esperada, quando se compara o resultado aos estudos envolvendo concreto [13-17]. Uma explicação possível para essa observação é a imprecisão do sensor para ambientes de umidade relativa elevada [38]. Outro motivo para o ocorrido, poderá ser a elevada evaporação de água durante a hidratação da cal na preparação da argamassa [7, 10, 40].

Os corpos-de-prova selados, após o início das medições, apresentaram uma diminuição relativamente pequena da umidade e o valor estabilizado em torno de $\sim 90\%$. A diferença máxima nos resultados para os dois CP's foi de $\sim 2\%$, para idades iniciais. Após as observações experimentais, pode-se afirmar que mesmo para os CP's selados, os valores inicialmente medidos foram em torno de 92-93%. Em comparação com medições em materiais à base de cimento, seria esperado um valor próximo de 100% [13, 15, 17]. A evaporação devido ao processo de hidratação durante a moldagem e a sensibilidade do sensor podem justificar esses resultados.

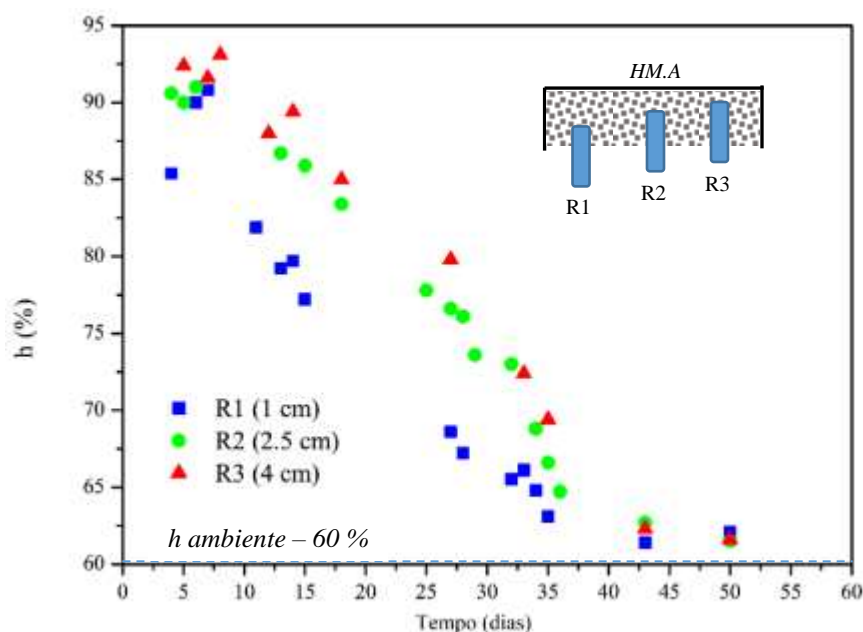


Figura 7: Umidade ao longo do tempo, medição em três pontos – Corpo-de-prova *HMA* (tempo expresso desde a moldagem)

Os três cilindros estudados (*H-H60-A*, *H-H60-B* e *H-H60-C*) apresentaram resultados semelhantes no que tange aos valores de umidade ao longo do tempo para a mesma profundidade (*hp-hor-1* e *hp-vert-1*). Um gráfico comparativo com os dados dos três cilindros testados para a tubo inserida a 3 cm de profundidade é apresentado na Figura 8.

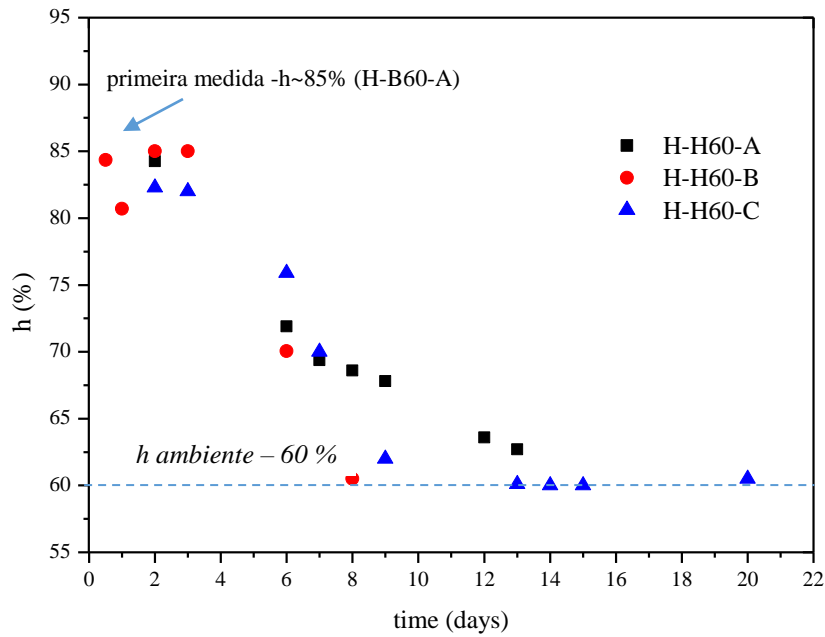


Figura 8: Resultados comparativos para a umidade em CP's cilíndricos *H-H60-A*, *H-H60-B* e *H-H60-C* (3 cm de profundidade - *hp-hor-1* e *hp-vert-1*).

Analisando-se os dados coletados durante o monitoramento da umidade para os três CP's, os resultados obtidos nas amostras testadas (*H-H60-A*, *H-H60-B* e *H-H60-C*) mostraram uma coerência razoável entre si para a profundidade de 3 cm. Na mesma idade e considerando-se a mesma profundidade de estudo, a diferença máxima dos valores medidos foi de ~ 5%, em torno do oitavo dia de monitoramento (ver a Figura 8). Essa pequena dispersão também pode estar relacionada à precisão do sensor utilizado na medição, ou a pequenas variações experimentais. Portanto, os resultados encontrados, refletem a viabilidade da configuração experimental (pelo menos do ponto de vista da repetibilidade).

Quanto aos resultados para os dois CP's testados com tubos inseridos na posição horizontal (*H-H60-B* e *H-H60-C*), para a profundidade de 1,3 cm (tubo *hp-hor-2*), os dados são mostrados na Figura 9.

Considerando-se os resultados apresentados na Figura 6, para as horas iniciais de monitoramento, quando apenas uma pequena parte da difusão ocorreu, os valores medidos no corpo-de-prova *H-H60-B* foram de ~90%. Estes valores eram semelhantes aos valores de umidade previamente medidos para a condição 1D (uniaxial) com o CP *HMA* (~93%). Com o objetivo de ilustrar os resultados obtidos especificamente para o cilindro *H-H60-C*, os valores de umidade nas duas profundidades medidas são apresentados na Figura 10.

No segundo dia, os valores medidos para as duas profundidades investigadas foram de ~ 83%; esses valores ilustram a diminuição rápida da umidade. Em termos comparativos, os valores foram menores do que os medidos para outros dois moldes para a condição 1D (*HMA*) na mesma idade: ~90%. Este resultado pode ser justificado pelo facto que, para esse molde axissimétrico, o processo de secagem ocorreu mais rápido, devido às características geométricas do mesmo.

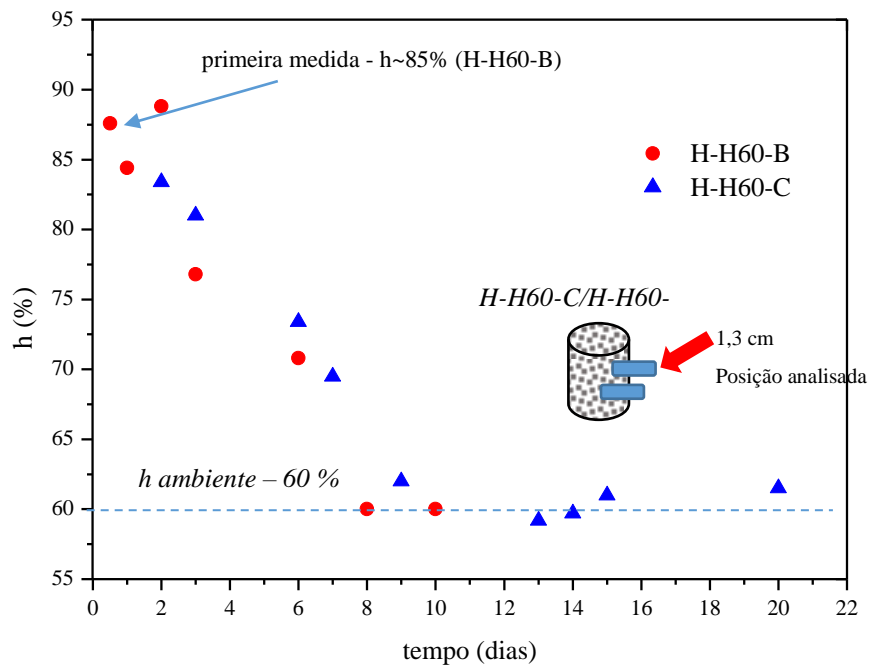


Figura 9: Resultados comparativos para a umidade em espécimes cilíndricos *H-H60-B* e *H-H60-C* (1,3 cm de profundidade, *hp-hor-2*), valores temporais expressos desde a exposição.

Os dados apresentados na Figura 10 indicam que, para as duas profundidades analisadas, a umidade para ambos os casos apresentou valores similares, o que indica que o gradiente de umidade medido durante o ensaio foi reduzido. Este resultado está em coerência com os dados já apresentados na Figura 7, para o *HM.A*, com fluxo em condição unidirecional.

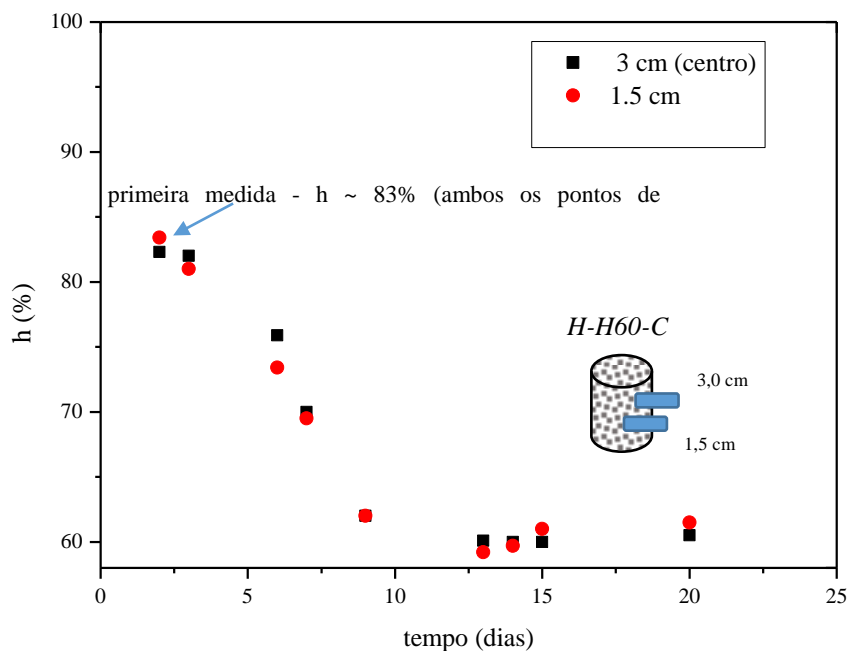


Figura 10: Análise da umidade em CP cilíndrico, corpo-de-prova: *H-H60-C* – duas profundidades, tempo expresso desde a exposição.

Em continuidade com os experimentos, a auto-dissecação foi analisada aqui mais uma vez, como já realizado como o molde prismático selado anteriormente citado. Para o corpo-de-prova cilíndrico, o método de vedação utilizado foi feito com o uso de tubos de plástico, parafina e camadas de plástico. Conforme adotado anteriormente, dois tubos de plástico foram usados para possibilitar a medição da umidade. Os tubos foram inseridos em duas profundidades diferentes (1,0 e 3 cm) na posição vertical (uma configuração similar dos tubos pode ser vista na Figura 5).

Os resultados coletados durante o estudo mostraram que os valores para as duas profundidades estudadas foram consistentes, com diferenças inferiores a ~2% (ver Figura 10) Os valores medidos concordaram também com os dados obtidos nos CP's prismáticos selados testados anteriores. Os valores medidos relacionados à umidade no experimento proposto para investigar a auto-dissecação foram de ~90%, e esse valor foi aproximadamente constante durante todo o ensaio, em torno de 22 dias (ver Figura 10).

4. CONCLUSÃO

O presente artigo aborda um programa experimental com foco no estudo de argamassas de cal aérea, no tocante ao processo de secagem e difusão da umidade. Após a definição do traço e da caracterização dos materiais, a primeira abordagem experimental incidiu sobre um corpo-de-prova de argamassa de cal aérea prismáticos com 5,3 cm de altura, 5,0 cm de espessura e 17,8 cm de comprimento, para os quais foi avaliada a evolução da umidade ao longo do tempo, através da inserção tubos de medições. A configuração experimental utilizada para a medição foi inspirada em trabalho passados e validados que mediram o perfil de umidade em peças de concreto.

Durante essa fase dos experimentos, foram fabricados três espécimes, sendo dois selados e um exposto simulando um fluxo uniaxial (1D), sendo os mesmos armazenados em uma câmara climática com umidade e temperatura controladas. Para o CP com uma face exposta, as medidas realizadas nas três profundidades estudadas evidenciaram que depois de cinquenta dias após a exposição, a amostra estava em equilíbrio com o meio ambiente, ou seja, com umidade igual a 60 % para as 3 profundidades estudadas.

Além disso, durante o monitoramento, valores similares de umidade foram obtidos para as três profundidades analisadas, resultado que pode ser considerado inesperado, pois, para o concreto e argamassas à base de cimento, o fluxo de umidade é lento, ou seja a umidade é normalmente diferente de acordo com a profundidade analisada indicando um gradiente. Esses resultados podem estar relacionados com uma elevada difusividade do material. No que se refere ao estudo dos CP's selados, as medições de auto-dissecação indicaram um valor de umidade final estabilizado de ~90%, significando que houve uma redução de ~10% em comparação com o estado saturado (100 %), sendo esse um valor elevado quando comparado aos valores usuais de concreto (~95 %).

Em continuidade com a pesquisa, uma segunda abordagem experimental incidiu sobre CP's cilíndricos de argamassa com diâmetro de 6cm e altura de 12cm, também armazenados em condições controladas. Os três CP's cilíndricos mostraram um resultado coerente em termos de valores iniciais de umidade quando comparados com o molde prismático testado anteriormente (1D), apresentando umidade inicial ~90%. Porém, ao longo do tempo demonstraram uma queda mais rápida no tocante aos valores de umidade quando comparados ao molde prismático, esse resultado se justifica uma vez que possuem uma geometria que favorece uma maior rapidez no processo difusivo. Os CP's cilíndricos alcançaram o equilíbrio com o meio ambiente após aproximadamente 10 dias. Para se confirmar os resultados, e o rápido decréscimo, dois tipos de sensores de umidade foram utilizados, sendo que ambos confirmaram a elevada difusividade da argamassa.

O decréscimo de umidade devido ao processo de auto-dissecação foi novamente medido, dessa vez para o molde cilíndrico, e os CP's selados apresentaram novamente umidade de ~ 90% até o final do experimento, valor coerente ao já medido no CP prismático.

Como consideração final, pode-se observar que o método utilizado para medição do perfil de umidade mostrou-se capaz de monitorar o decréscimo dos valores tanto pela auto-dissecação como pelo processo de difusão. Dois sensores distintos de umidade foram utilizados e ambos indicaram um rápido decréscimo na umidade, ou seja, uma elevada difusividade da argamassa, resultados coerentes foram obtidos.

O trabalho utilizou uma abordagem experimental já utilizada em peças de concreto e argamassas de cimento em um material com estudos relacionados a esse aspecto muito escassos e que ainda carece de mais investigação.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela FCT (Fundação Portuguesa para a Ciência e Tecnologia) e pelo CNPq através da bolsa de doutoramento concedida ao primeiro autor.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] WARREN, M., *Economic Analysis for Property and Business*, 1. ed., Edition Butterworth-Heinemann, 2000.
- [2] OLIVEIRA, M.A.N., *A Multi-Physics Approach Applied to Masonry Structures with Non-Hydraulic Lime Mortars*, Tese de D.Sc., Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2016.
- [3] LOURENÇO, P.B., *Computational Strategies for Masonry Structures*, Tese de D.Sc., Delft University of Technology, Delft, Holanda, 1996.
- [4] BINDA, L., SAISI A., TIRABOSCHI, C. “Investigation procedures for the diagnosis of historic masonries”, *Construction and Building Materials*, v. 14, n. 4, pp. 199-233, Jun. 2000.
- [5] OLIVEIRA, D.V.C., *Experimental and Numerical analysis of blocky masonry structures under cyclic loading*, Tese de D.Sc, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2002.
- [6] OLIVEIRA, M.A., AZENHA, M., LOURENÇO, P.B., *et al.*, “Study of the evolution of carbonation in aerial lime mortars”, In: *V Fical - FICAL – FORUM IBÉRICO DA CAL*, Lisboa, Portugal, 10-12, Junho 2016.
- [7] OLIVEIRA, M.A., AZENHA M., LOURENÇO P.B., *et al.*, “Experimental analysis of the carbonation and humidity diffusion processes in aerial lime mortar”, *Construction and Building Materials*, v. 148, n. 1, pp. 38-48, Set. 2017.
- [8] SCANNELL, S., LAWRENCE M., WALKER P., “Impact of Aggregate Type on Air Lime Mortar Properties”, *Energy Procedia*. 2014, v. 62, n. 1, pp. 81-90, 2014.
- [9] LAWRENCE, R.M.H., MAYS, T.J., RIGBY, S.P., *et al.*, “Effects of carbonation on the pore structure of non-hydraulic lime mortars”, *Cement and Concrete Research*, v. 37 n. 7, pp.1059-69, Jul. 2007.
- [10] LAWRENCE, R.M.H., *A Study of Carbonation in Non-Hydraulic Lime Mortars*, Tese de D.Sc., University of Bath, Bath, Inglaterra, 2006.
- [11] SAETTA, A.V., VITALIANI, R.V., “Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures: Part II. Practical applications”, *Cement and Concrete Research*, v.35 n. 5, pp. 958-67, Mai. 2005.
- [12] MONTES-HERNANDEZ, G., POMMEROL, A., RENARD, F., *et al.*, “In situ kinetic measurements of gas–solid carbonation of Ca(OH)₂ by using an infrared microscope coupled to a reaction cell”, *Chemical Engineering Journal*, v. 161, n. 1–2, pp. 250-256, Jul. 2010.
- [13] KIM, J.-K., LEE C.-S., “Moisture diffusion of concrete considering self-desiccation at early ages” *Cement and Concrete Research*, v. 29 n. 12, pp. 1921-1927, Aug. 1999.
- [14] MATSUSHITA, F., AONO, Y., SHIBATA, S., “Carbonation degree of autoclaved aerated concrete”, *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 11, pp. 1741-1745, Nov. 2000.
- [15] KANG, S., KIM J., LEE Y., *et al.*, “Moisture Diffusivity of Early Age Concrete Considering Temperature and Porosity”. *KSCE, Journal of Civil Engineering*, v. 16, n. 1, pp. 179-88, Jun. 2012.
- [16] AZENHA, M., MAEKAWA, K., ISHIDA, T., *et al.*, “Drying induced moisture losses from mortar to the environment. Part I: experimental research”, *Materials and Structures*, v. 40, n. 8, pp.801-811, Mai. 2007.
- [17] KIM, J.K., LEE C.S., “Prediction of differential drying shrinkage in concrete”, *Cement and Concrete Research*, v. 28, n. 7, pp. 985-994, Jul. 1998.
- [18] AZEVEDO, J., GUIMARÃES, A., DIAZ GONÇALVES, T., “Uncertainty in absorption and drying of a mortar and a brick contaminated with six different binary salts”, In: *CRYSPOM IV*, Amsterdam, Holanda, 19-21, Junho 2014.
- [19] LANAS, J., SIRERA, R., ALVAREZ, J. I., “Study of the mechanical behavior of masonry repair lime-based mortars cured and exposed under different conditions”, *Cement and Concrete Research*, v. 36, n. 5, pp. 961-970, Dez. 2006.

- [20] LANAS, J., SIRERA R., ALVAREZ J.I., “Compositional changes in lime-based mortars exposed to different environments”, *Thermochimica Acta*, v. 429 n. 2, pp. 219-26, Mai. 2005.
- [21] ARIZZI, A., CULTRONE G., “The influence of aggregate texture, morphology and grading on the carbonation of non-hydraulic (aerial) lime-based mortars”, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, v. 46, n. 4, pp. 507-20, Out. 2013.
- [22] OLIVEIRA, M.A., AZENHA M., LOURENÇO P.B., “Simulation of Humidity Fields in Concrete: Experimental Validation and Parameter Estimation”. *Journal of Advanced Concrete Technology - J-Stage*, v. 13, n. 4, pp. 214-29, Jul. 2015.
- [23] LANAS, J., PÉREZ BERNAL, J. L., BELLO, M. A., *et al.*, “Mechanical properties of natural hydraulic lime-based mortars”, *Cement and Concrete Research*, v. 34, n. 12, pp. 2191-2201, Dez. 2004.
- [24] TORNEY, C., FORSTER, A.M., SZADURSKI, E.M., “Specialist ‘restoration mortars’ for stone elements: a comparison of the physical properties of two stone repair materials”, *Heritage Science*, v. 2, n. 1, pp. 1-12, Jan. 2014.
- [25] ARIZZI, A., CULTRONE, G., “The influence of aggregate texture, morphology and grading on the carbonation of non-hydraulic (aerial) lime-based mortars”, *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, v. 46 n. 4, pp. 507-20, Out. 2013.
- [26] FORSTER, A.M., “Hot-Lime Mortars: A Current Perspective”, *Journal of Architectural Conservation* v. 10, n. 3, pp. 7-27, Mai. 2004.
- [27] FORSTER, A.M., “The Scottish Experience of Lime Mortars, Renders and Harling”, *International Journal for Restoration*, v. 10, n. 6, pp. 637-647, Jan. 2004.
- [28] VÁLEK, J., MATAS T., “*Experimental Study of Hot Mixed Mortars in Comparison with Lime Putty and Hydrate Mortars*”, In: Historic Mortars: 269-81, Dordrecht, Netherlands, 19-21 March, 2012.
- [29] MARGALHA, G., VEIGA R., SILVA A.S., BRITO, J., “Traditional methods of mortar preparation: The hot lime mix method”, *Cement and Concrete Composites*, v. 33, n. 8, pp. 796-804, Set. 2011.
- [30] MALINOWSKI, E.S., HANSEN, T.S., “Hot Lime Mortar in Conservation—Repair and Replastering of the Façades of Läckö Castle”. *Journal of Architectural Conservation*, v. 17, n. 1, pp. 95-118, Jan. 2011.
- [31] VÁLEK, J., MATAS T. *Experimental study of hot mixed mortars in comparison with lime putty and hydrate mortars*, In: 2nd Conference on Historic Mortars - HMC 2010 and RILEM TC 203-RHM final workshop, Praga, República Tcheca, Setembro, 2010.
- [32] MOROPOULOU, A., TSIOURVA, T., BISBIKOU, K., *et al.*, “Hot lime technology imparting high strength to historic mortars”. *Construction and Building Materials*, v. 10, n. 2: pp. 151-159, Mar. 1996
- [33] CEN. *CEN-EN-196-1-Methods of testing cement. Determination of strength*. European Committee for Standardization, pp. 36, 2005.
- [34] GUIMARÃES, E.T., “Parametrical Studies of the Behavior of Aerial Lime Mortars”, Tese de M.Sc., Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2014.
- [35] GORE, W.L.A. *Gore-Tex*. Material Specification, Madrid, Spain, 2014.
- [36] TANABE, T., SAKATA, K., MIHASHI H., *et al.*, “Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures”, In: *CONCREEP 8*, Ise-Shima, Japan, 30 Setembro - 2 Outubro 2008.
- [37] GRASLEY, Z., LANGE D., D'AMBROSIA M., “Internal relative humidity and drying stress gradients in concrete”, *Materials and Structures*, v. 39, n. 9, pp. 901-910, Nov. 2006.
- [38] QUINCOT, P.G., “Measurement of internal moisture distribution in concrete with relative humidity sensors”, Tese de M.Sc., Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, 2012.
- [39] VAISALA, *Operating Manual*. HMI41 Indicator and HMP42 Probe. Helsinki, Finland: Vaisala Oyj, 2004.
- [40] MENEGHINI, A., Experimental Characterization of Aerial Lime Mortars in View of Multiphysics Modelling, Tese de M.Sc., Università Degli Studi di Padova, Padova, Itália, 2014.
- [41] SNOW, J., TORNEY, C., *Lime Mortars in Traditional Buildings*, Technical Report, Edinburgh: Historic Scotland, pp. 44, 2014.
- [42] SENSORIUM, *DATASHEET EVALUATION KIT EK-H4 - SHT75*, Switzerland, pp. 8, 2015.

ORCID

Miguel Azenha	https://orcid.org/0000-0003-1374-9427
Paulo Barbosa Lourenço	https://orcid.org/0000-0001-8459-0199
Anna Meneghini	https://orcid.org/0000-0001-6997-0425
Erika Guimarães	https://orcid.org/0000-0002-0743-7307
Mateus A. N. Oliveira	https://orcid.org/0000-0002-3027-3312