

Estudo experimental de argamassas à base de cal e gesso

Experimental study of lime- and gypsum-based mortars

Graça Vasconcelos¹ | Alessandra Alves² | Mário Pereira²

¹ISISE– Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Engenharia de Estruturas, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal

²Departamento de Física, Universidade do Minho, Portugal

<https://doi.org/10.82452/me20263704>

abstract

Lime and gypsum are mineral binders traditionally used in historic mortars, recognized for their compatibility with ancient masonry and their distinct physical–mechanical behavior. Aerial lime hardens predominantly through carbonation, resulting in porous and deformable mortars, whereas gypsum is characterized by rapid hydration and the early development of mechanical strength. In this context, the incorporation of gypsum into lime-based mortars has been investigated as a means to improve mechanical performance and accelerate the curing process. This study investigates the effect of incorporating different percentages of gypsum into lime mortars, analyzing its influence on physical and mechanical properties and on the evolution of carbonation over curing time. For this purpose, an experimental campaign was carried out, including porosity and capillary water absorption tests, flexural and compressive strength tests, as well as thermogravimetric and mineralogical analyses, allowing relationships to be established between composition, microstructure, and mortar performance.

Keywords: Mortars, lime, gypsum, carbonation, physical and mechanical properties

resumo

A cal e o gesso são ligantes minerais tradicionalmente utilizados em argamassas históricas, reconhecidos pela sua compatibilidade com alvenarias antigas e pelo seu comportamento físico-mecânico distinto. A cal aérea endurece predominantemente por carbonatação, originando argamassas porosas e deformáveis, enquanto o gesso se caracteriza por uma rápida hidratação e pelo desenvolvimento precoce de resistência. Neste contexto, a incorporação de gesso em argamassas de cal tem sido estudada como forma de melhorar o desempenho mecânico e acelerar o processo de cura. O presente trabalho investiga o efeito da incorporação de diferentes percentagens de gesso em argamassas de cal, analisando a sua influência nas propriedades físicas e mecânicas e na evolução da carbonatação ao longo do tempo de cura. Para tal, foi desenvolvida uma campanha experimental que incluiu ensaios de porosidade, absorção por capilaridade, resistência à flexão e compressão, bem como análises termogravimétricas e mineralógicas, permitindo estabelecer relações entre composição, microestrutura e desempenho das argamassas.

Palavras-chave: Argamassas, cal, gesso, carbonatação, propriedades físicas e mecânicas

1- INTRODUÇÃO

A cal e o gesso figuram entre os ligantes minerais mais antigos utilizados pelo ser humano, com aplicação documentada desde as primeiras civilizações, inicialmente em revestimentos e, posteriormente, em sistemas de alvenaria estrutural. A cal, sob a forma de óxido de cálcio (cal viva) ou hidróxido de cálcio (cal apagada), destacou-se historicamente pela elevada trabalhabilidade, boa durabilidade e elevada compatibilidade físico-química com alvenarias tradicionais à base de pedra e tijolo [1-3].

Na engenharia romana, a cal aérea foi frequentemente combinada com materiais pozolânicos naturais, originando ligantes com propriedades hidráulicas que permitiram o desenvolvimento de resistências mecânicas mais elevadas e uma cura eficaz mesmo em ambientes húmidos ou submersos [4-5]. Nas argamassas de cal aérea, o ganho de resistência ocorre predominantemente por carbonatação do hidróxido de cálcio, processo que conduz à formação progressiva de carbonato de cálcio. Este mecanismo está associado a uma microestrutura porosa e relativamente flexível, capaz de acomodar deformações e reduzir a suscetibilidade à fissuração, característica particularmente relevante em construções históricas [3, 6-7].

O gesso (sulfato de cálcio) foi igualmente amplamente utilizado na Antiguidade. No Egito antigo, era aplicado em revestimentos e em elementos construtivos, enquanto na Grécia clássica foi empregue em templos, teatros e elementos decorativos. Os Romanos aperfeiçoaram a sua utilização em rebocos interiores e em pinturas a fresco, explorando a sua rápida presa e boa capacidade de acabamento superficial [2]. Durante o período islâmico, o estuque à base de gesso assumiu um papel central na arquitetura decorativa, permitindo a execução de geometrias complexas e detalhadas, graças à sua elevada plasticidade e rápido endurecimento. Esta técnica difundiu-se na Península Ibérica durante a ocupação islâmica (séculos VII–XII), sendo amplamente utilizada em Portugal e Espanha em argamassas de revestimento. Em território espanhol, o gesso foi também aplicado em elementos estruturais, nomeadamente arcos e abóbadas, evidenciando a sua versatilidade enquanto ligante construtivo [8-10].

Com o objetivo de melhorar o desempenho mecânico das argamassas de cal e acelerar o seu processo de cura, tem sido investigada a incorporação de gesso em matrizes à base de cal. Em paralelo, diversos estudos têm analisado a adição de cal em argamassas de revestimento à base de gesso, visando a melhoria da trabalhabilidade, durabilidade e compatibilidade com suportes tradicionais [11-14]. A contribuição do gesso é reconhecida, sobretudo, pela sua capacidade de promover o desenvolvimento precoce de resistências mecânicas, resultante da sua rápida hidratação e elevada capacidade de ligação, conduzindo a argamassas com maior coesão interna. Adicionalmente, a produção do gesso envolve temperaturas de calcinação significativamente inferiores às necessárias para a obtenção da cal, o que se traduz num menor consumo energético e numa redução das emissões associadas. Assim, a incorporação de gesso em argamassas de cal surge como uma estratégia potencialmente mais sustentável, permitindo conciliar melhorias no desempenho mecânico com benefícios de natureza ambiental.

Este trabalho tem como principal objetivo investigar os efeitos da incorporação de gesso, em diferentes percentagens, em argamassas de cal, de modo a compreender de que forma esta adição influencia as propriedades físicas e mecânicas das argamassas. Em detalhe, pretende-

se com este trabalho: (i) avaliar o efeito da incorporação de gesso nas propriedades físicas e mecânicas da argamassa; (ii) avaliar o efeito do gesso na carbonatação da argamassa para diferentes idades de cura; (iii) analisar a relação entre carbonatação da argamassa em função da idade de cura e a sua influência nas propriedades físicas e mecânicas; (iv) analisar o efeito da adição de gesso na composição mineralógica e na microestrutura das misturas de argamassa. Para este efeito foi definida uma campanha experimental que engloba diferentes fases: (i) definição do programa experimental, nomeadamente as composições de argamassa com diferentes percentagens de cal e gesso, (ii) seleção e definição dos protocolos experimentais para caracterização dos materiais e caracterização física, mecânica, química e mineralógica das misturas de argamassa (ensaios de porosidade e absorção de água por capilaridade, ensaios de flexão e compressão, ensaios de termogravimetria, difração de raios x; (iii) realização dos ensaios experimentais para caracterização física e mecânica e análise detalhada dos resultados.

2- MATERIAIS

2.1. Materiais e composições de argamassa

Como mencionado anteriormente, o principal objetivo deste trabalho consiste na avaliação do efeito da adição de gesso a argamassas de cal, quer ao nível das propriedades físicas, quer ao nível das propriedades mecânicas. Deste modo, os materiais utilizados nas argamassas em estudo foram cal hidratada (CL90-S), gesso hemi-hidratado (SIGEL – Estuque), areia siliciosa e água.

A densidade aparente dos materiais foi determinada de acordo com o procedimento descrito por Alves (2025) [14]. Obtiveram-se os seguintes valores: 1620,5 kg/m³ para a areia, 418 kg/m³ para a cal hidratada e 930 kg/m³ para o gesso hemi-hidratado. A curva granulométrica da areia, determinada segundo a norma EN 1015-1 [16], resulta da média de seis ensaios, conforme ilustrado na Fig. 1. Verifica-se que a distribuição granulométrica abrange partículas com dimensões compreendidas entre 63 μ m e 2 mm, tendo-se registado 2,31 % em massa da amostra com dimensões superiores a 2 mm

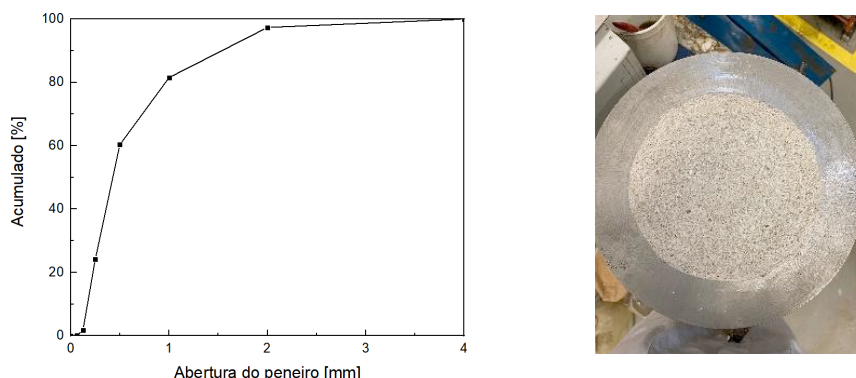


Fig. 1 | Distribuição granulométrica da areia

Considerou-se uma argamassa de cal e areia para servir de referência (M1) e três misturas em que o ligante consistiu numa combinação de cal e gesso, e areia (M2, M3 e M4). Parte da cal considerada na mistura de referência M1 foi substituída por dada percentagem de gesso. Assim, as misturas de argamassa foram definidas pelas seguintes percentagens de ligante: (i) M1 constituída por 100% de cal ($\text{Ca}(\text{OH})_2$); (ii) M2- constituída por 90% do volume de cal e 10% de volume de gesso ($\text{CaSO}_4, 0.5 \text{ H}_2\text{O}$); (iii) M3 constituída por 80% de volume de cal e 20% do volume de gesso, (iv) M4 constituída 70% de peso de cal e 30% de volume de gesso (Tabela 1). A quantidade de água utilizada na mistura das argamassas foi definida com base na obtenção de uma trabalhabilidade de 170 ± 10 mm, correspondente a uma consistência plástica. Os ensaios de trabalhabilidade das argamassas foram realizados de acordo com a norma EN 1015-3 [17] que estabelece o método para a determinação da consistência das argamassas no estado fresco.

Para o processo de mistura automática das argamassas, foram seguidos os procedimentos definidos nas normas EN 1015-2 [18]. Verifica-se que a relação água/ ligante diminui com o aumento da percentagem de substituição da cal pelo gesso, o que está diretamente relacionado com o tamanho reduzido das partículas de cal, quando comparado com o gesso.

Tabela 1 | Materiais e composições das misturas de argamassa

Mistura	Ligante	Cal:gesso:areia (volume)	Relação água:ligante	Espalhamento (mm)
M1	Cal	1:3	2.35	163
M2	Cal +gesso	0.9:0.1:3	1.75	160
M3	Cal +gesso	0.8:0.2:3	1.65	165
M4	Cal +gesso	0.7:0.3:3	1.45	159

2.2. Procedimentos experimentais

Com o objetivo de avaliar o efeito da substituição parcial da cal por diferentes percentagens de gesso, foi definido um programa experimental para a determinação das propriedades físicas (densidade aparente, porosidade aberta e absorção de água por capilaridade) e das propriedades mecânicas (resistência à flexão e à compressão).

Pretendeu-se ainda analisar o efeito da adição de gesso no processo de carbonatação da cal, tendo sido definida uma campanha de ensaios termogravimétricos, complementada por ensaios de difração de raios X (XRD), para a identificação das fases cristalinas em diferentes idades de cura. Para este efeito, os ensaios de caracterização experimental foram realizados aos 28, 60 e 90 dias de cura das argamassas. A cura dos provetes foi realizada sob condições controladas de temperatura e humidade relativa, em conformidade com a norma EN 1015-11 [19].

2.2.1 Ensaios de caracterização física

As propriedades físicas, densidade aparente e porosidade aberta, das diferentes composições de argamassa foram determinadas com base na norma EN 1936 [20] para as três diferentes idades de cura da argamassa. Para este efeito foram utilizados provetes prismáticos (40mmx40mmx160mm).

As amostras foram secas e pesadas para determinação da massa seca (m_{sec}). A saturação foi realizada sob vácuo, mantendo as amostras durante 3 h em vácuo para remoção do ar dos poros, após o que foi introduzida água destilada até à sua completa imersão. As amostras permaneceram em imersão sob vácuo por mais 3 h. Concluída esta etapa, foram retiradas, secas superficialmente e pesadas para determinação da massa saturada (m_{sat}). Por fim, as amostras foram pesadas imersas em água, permitindo a determinação da massa imersa (m_{ime}). A porosidade aberta (η) é calculada através da equação:

$$\eta = \frac{m_{sat} - m_{sec}}{m_{sat} - m_{ime}} \times 100 \quad (1)$$

A absorção de água por capilaridade é um parâmetro físico relevante das argamassas, associado à penetração e transporte de humidade na sua estrutura porosa. A humidade ascensional em edifícios antigos depende essencialmente da porosidade capilar dos materiais. O fenómeno é governado pelo tamanho, distribuição e conectividade dos poros, que controlam o desenvolvimento das forças capilares. Para a obtenção deste parâmetro, foram realizados ensaios de absorção de água por capilaridade de acordo com a norma EN 1015-18 [21]. Os provetes prismáticos foram secos em estufa a 60°C durante 24 h até estabilização da massa, registando-se a massa seca. Após a secagem, foram acondicionados em câmara climática (20 ± 2 °C; 65 ± 5 % HR) e colocados em contacto com 5 ± 1 mm de água destilada, permitindo a absorção de água predominantemente pela base. Durante o ensaio, o recipiente foi mantido fechado para evitar evaporação. O coeficiente de absorção de água por capilaridade é determinado pela seguinte expressão:

$$C_i = \frac{m(t) - m_{sec}}{A\sqrt{t}} \quad (2)$$

em que C_i é o coeficiente de absorção por capilaridade [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{0.5})$]; $m(t)$ é a massa da amostra no instante t ; m_{sec} é a massa seca da amostra; A é a área da secção em contacto com a água; t é o tempo decorrido desde o início do ensaio.

2.2.2 Ensaios de caracterização mecânica

A caracterização mecânica das argamassas foi realizada através de ensaios de flexão e compressão, de acordo com a norma EN 1015-11 [20]. Para cada mistura e para cada idade de cura (28, 60 e 90 dias), foram ensaiados três provetes prismáticos com dimensões de 4 × 4 × 16 cm³ (Fig. 2a).

Os ensaios de flexão foram efetuados em configuração de carga a três pontos, com aplicação de uma carga vertical concentrada a meio vão do provete. Os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento, a uma velocidade constante de 0,006 mm/s, até à rotura do material. A resistência à flexão da foi determinada de acordo com a norma EN 1015-11 [19].

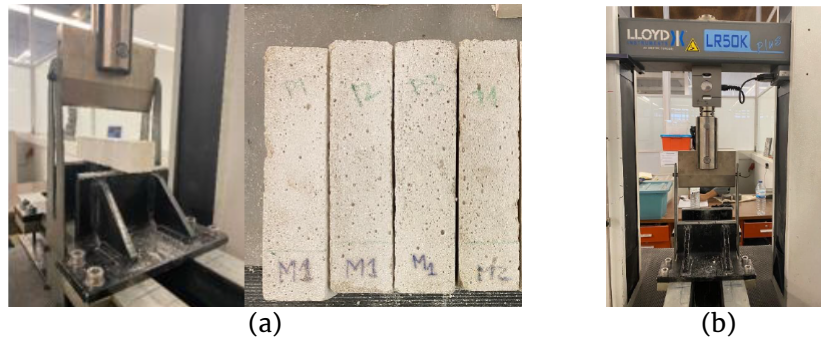


Fig. 2 | Caracterização mecânica; (a) ensaios de flexão; (b) ensaios de compressão.

Após os ensaios de flexão, os meios provetes resultantes foram utilizados nos ensaios de compressão, perfazendo um total de seis amostras por mistura e por idade de cura (Fig. 2b). Os ensaios de compressão foram realizados em controlo de força, com uma taxa de carregamento de 50 N/s, até à rotura do material. Todos os ensaios mecânicos foram realizados utilizando uma máquina de ensaios universal Lloyd LR50K Plus.

2.2.3 Análise termogravimétrica

A análise térmica é uma técnica utilizada para estudar o comportamento físico e químico dos materiais em função da temperatura. A análise termogravimétrica (TGA) avalia a variação de massa de uma amostra durante aquecimento controlado, associada a processos como desidratação, descarbonatação ou decomposição. A termogravimetria diferencial (DTG), correspondente à derivada da curva obtida por TGA, permite identificar com maior precisão os intervalos de temperatura associados às diferentes reações térmicas.

A análise termogravimétrica das argamassas foi realizada num equipamento SDT Q600, sob atmosfera de azoto, com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min. Com o objetivo de analisar a carbonatação das diferentes misturas (M1, M2, M3 e M4) foram analisadas uma amostra retirada na superfície, a), e uma amostra retirada do núcleo, b), dos provetes prismáticos, ver Fig. 3. Este procedimento foi repetido para as diferentes idades de cura (28, 60 e 90 dias). A preparação das amostras para os ensaios termogravimétricos foi semelhante ao procedimento descrito em Alves (2025) [15].

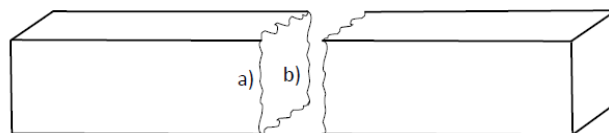


Fig. 3 | Identificação dos locais das amostras para a análise termogravimétrica

2.2.4 Ensaios de difração de raios x (XRD)

A difração de raios X (DRX) é uma técnica analítica utilizada para a identificação das fases e da estrutura cristalina de materiais. Baseia-se na difração de um feixe de raios X monocromático pela rede cristalina da amostra, segundo a lei de Bragg, originando um padrão característico de cada fase cristalina. Os resultados são apresentados sob a forma de difratogramas, cuja análise permite a identificação qualitativa e, em alguns casos,

semiquantitativa das fases presentes, através da comparação com padrões cristalográficos de referência do *International Centre for Diffraction Data* (ICDD).

As medições de DRX foram realizadas em geometria $\theta-2\theta$, à temperatura ambiente, utilizando um difratômetro Bruker AXS D8 Discover (Karlsruhe, Alemanha), equipado com um detetor LynxEye baseado em tiras de silício (Bruker). Os difratogramas foram recolhidos no intervalo de 2θ entre 5° e 80° , com um passo angular de $0,02^\circ$ e um tempo de contagem de 1 s por passo. A identificação das fases foi efetuada recorrendo ao software Bruker AXS DIFFRAC.EVA (versão 4.2.2), em conjunto com a base de dados do Centro Internacional de dados de difração (ICDD). Foi analisada uma amostra de cada composição de argamassa e para as três diferentes idades de cura. A preparação das amostras foi semelhante ao procedimento descrito em Alves (2025) [15].

3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Avaliação da evolução da carbonatação das argamassas

A perda de massa com a temperatura durante o ensaio de termogravimetria para a argamassa de cal para o núcleo e superfície e para as três idades de cura está indicada na Fig. 4. Para as argamassas de cal-gesso, decidiu-se apresentar os resultados da análise termogravimétrica para a composição M3 (Fig. 5). A análise termogravimétrica revela diferenças entre a argamassa de cal e as argamassas de cal-gesso. Na argamassa de cal e areia observa-se, para além da perda de massa inicial associada à evaporação da água livre, uma perda de massa na gama de temperaturas entre 350°C e 450°C , bem como uma perda de massa entre 600°C e 900°C . A perda observada entre 350°C e 450°C é característica da desidroxilação do hidróxido de cálcio, enquanto a perda entre 600°C e 800°C corresponde essencialmente à descarbonatação do carbonato de cálcio presente na matriz da argamassa. Nas argamassas de cal-gesso-areia, para além das perdas identificadas a 350°C e 450°C e 600°C e 900°C , identifica-se uma perda de massa adicional concentrada entre 100°C e 200°C , atribuída à desidratação do gesso [22-23].

Relativamente à perda de massa associada à desidroxilação do hidróxido de cálcio ($350-500^\circ\text{C}$), os resultados demonstram uma redução progressiva de hidróxido de cálcio ao longo do tempo, particularmente no núcleo. Aos 28 dias de cura, ainda se consegue identificar a presença de hidróxido de cálcio disponível, mas a partir dos 60 dias verifica-se uma redução abrupta, na maioria dos casos, especialmente na superfície das amostras. Esta diminuição está diretamente relacionada com a carbonatação do material, uma vez que o Ca(OH)_2 reage com o CO_2 presente no ambiente para formar carbonato de cálcio (CaCO_3). As amostras retiradas da superfície dos provetes apresentam valores de hidróxido de cálcio sistematicamente inferiores aos do núcleo.

No caso da decomposição do carbonato de cálcio (600–900°C), observa-se o efeito inverso: a perda de massa aumenta com o tempo de cura. No núcleo, a percentagem de perda de massa na gama de temperaturas correspondente à decomposição do carbonato de cálcio aumenta significativamente entre os 28 e os 60 dias, mas tende a estabilizar ou apresentar variações menos expressivas entre os 60 e os 90 dias.

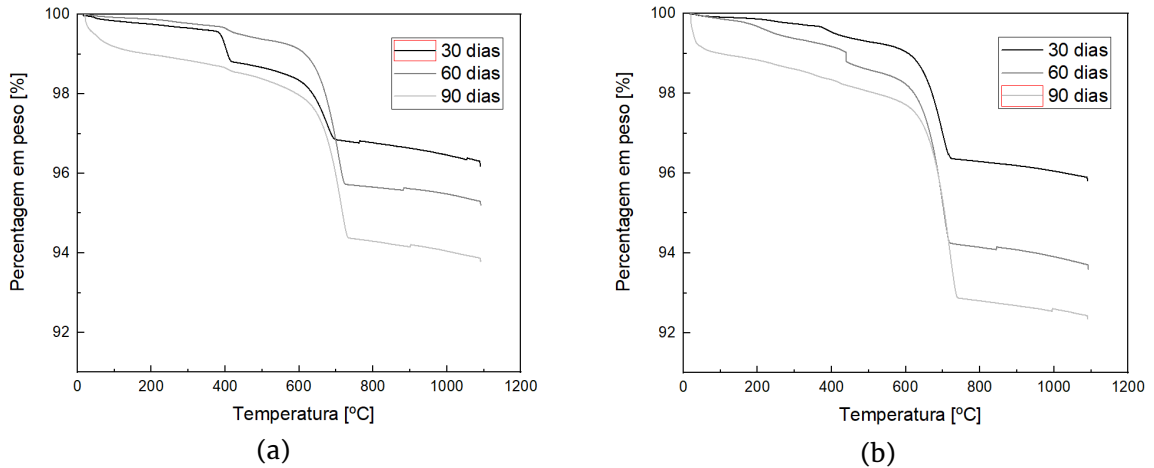


Fig. 4 | Análise termogravimétrica – Composição M1; (a) núcleo; (b) superfície

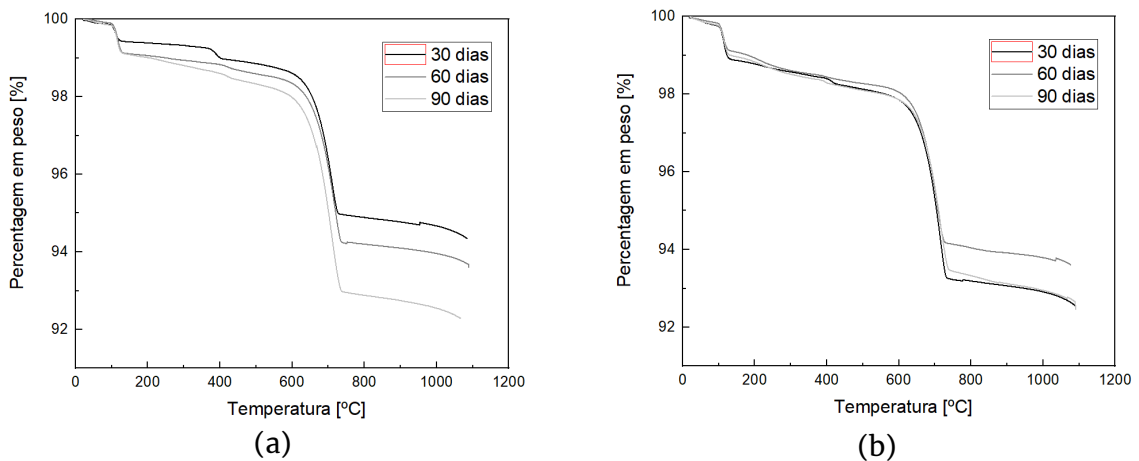


Fig. 5 | Análise termogravimétrica – Composição M3; (a) núcleo; (b) superfície

Assumindo que a amostra utilizada no ensaio de análise termogravimétrica (TGA) é homogénea e que as proporções dos constituintes se mantêm representativas da mistura inicial, o grau de carbonatação pode ser determinado com base na comparação entre o teor inicial de hidróxido de cálcio e o teor remanescente após exposição ao dióxido de carbono. A percentagem de carbonatação é calculada através da seguinte expressão:

$$\% \text{ Carbonatação} = \frac{Cal_{\text{inicial}} - Ca(OH)_{2,\text{presente}}}{Cal_{\text{inicial}}} \times 100 \quad (3)$$

em que Cal_{inicial} corresponde ao teor mássico inicial de hidróxido de cálcio disponível na mistura. O teor inicial de cal é determinado a partir da composição da argamassa, considerando a fração de $Ca(OH)_2$ não carbonatada, de acordo com:

$$Cal_{\text{inicial}} = \frac{\text{quant. cal} - CaCO_3}{\text{quant. areia} + \text{quant. gesso hidratado} + \text{quant. cal}} \times 100 \quad (4)$$

onde o teor de carbonato de cálcio é subtraído por corresponder à fração de cal previamente carbonatada.

A massa de hidróxido de cálcio presente na amostra e identificada no ensaio de TGA é obtida a partir da perda de massa associada à desidroxilação do Ca(OH)_2 , normalmente observada no intervalo de temperaturas entre aproximadamente $350\text{ }^\circ\text{C}$ e $450\text{ }^\circ\text{C}$. Essa massa é calculada com base na relação estequiométrica entre as massas molares do hidróxido de cálcio ($M(\text{Ca(OH)}_2) = 74,1\text{ g/mol}$) e da água ($M(\text{H}_2\text{O}) = 18,016\text{ g/mol}$):

$$\text{massa Ca(OH)}_2 = \frac{M(\text{Ca(OH)}_2)}{M(\text{H}_2\text{O})} \times \% \text{ perda de H}_2\text{O} \quad (5)$$

Deste modo, a variação de massa registada no ensaio de TGA permite quantificar o teor de Ca(OH)_2 remanescente na amostra, o qual corresponde à fração de cal que não reagiu com o dióxido de carbono. O grau de carbonatação medido na superfície dos provetes é sistematicamente superior ao observado no respetivo núcleo, tanto nas argamassas de cal (Fig. 6a) como nas argamassas de cal-gesso, conforme exemplificado na Fig. 6b para a composição M3.

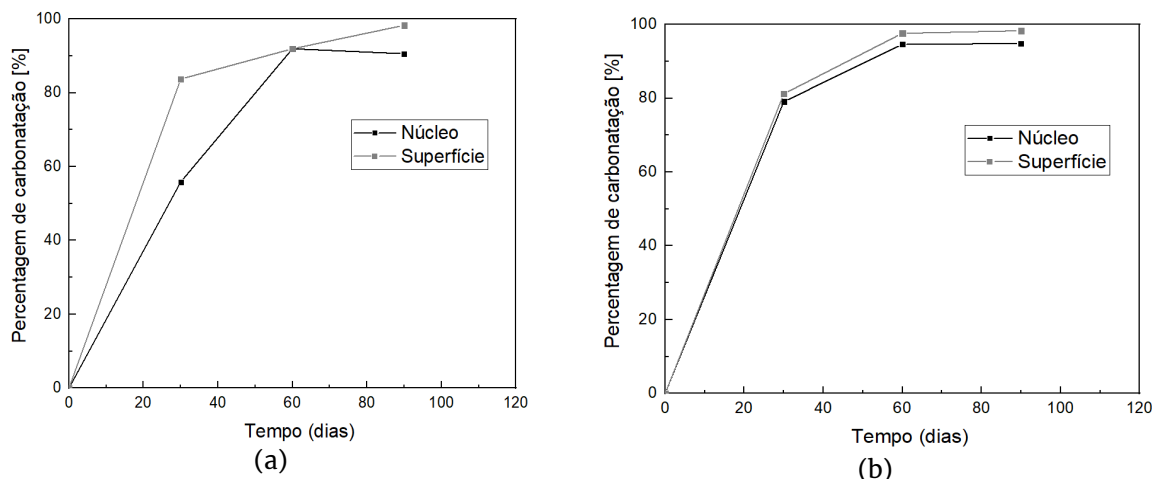


Fig. 6 | Evolução da carbonatação com a idade de cura (%); (a) Composição M1; (b) Composição M3

Este comportamento resulta da maior acessibilidade da superfície à difusão do dióxido de carbono (CO_2) atmosférico, o que promove a reação do CO_2 com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) presente na argamassa e conduz à formação de carbonato de cálcio (CaCO_3) [22–23]. No interior dos provetes, a difusão do CO_2 é mais limitada, originando taxas de carbonatação inferiores, fortemente condicionadas pela microestrutura da argamassa. Com o aumento da idade de cura, os produtos de carbonatação tendem a preencher progressivamente a rede porosa, reduzindo a permeabilidade ao CO_2 e atrasando o avanço da frente de carbonatação, sendo por isso mais lenta a progressão da carbonatação aos 60 e 90 dias de cura.

3.2 Análise das fases cristalinas

Os resultados de difração de raios X (XRD) indicam que, independentemente do teor de gesso, todas as misturas apresentam uma evolução progressiva da carbonatação ao longo do tempo.

Aos 28 dias, é detetada a presença simultânea de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e carbonato de cálcio (CaCO_3), evidenciando que o processo de carbonatação já se iniciou, embora subsistam quantidades significativas de Ca(OH)_2 não reagido. Aos 60 dias, observa-se um aumento da intensidade das fases associadas ao CaCO_3 , acompanhado por uma redução na detecção de Ca(OH)_2 , o que indica um aumento da conversão do hidróxido em carbonato durante este período. Aos 90 dias, a predominância das fases de CaCO_3 confirma que a carbonatação atingiu um estado mais avançado.

Esta evolução temporal sugere que a carbonatação ocorre de forma mais intensa nos primeiros 60 dias, período durante o qual a reação entre o CO_2 atmosférico e o Ca(OH)_2 é mais ativa. Após este intervalo, a taxa de progressão da carbonatação diminui, possivelmente devido à redução da disponibilidade de Ca(OH)_2 e ao preenchimento progressivo da rede porosa pelos produtos de carbonatação, o que limita a difusão de CO_2 para o interior da matriz.

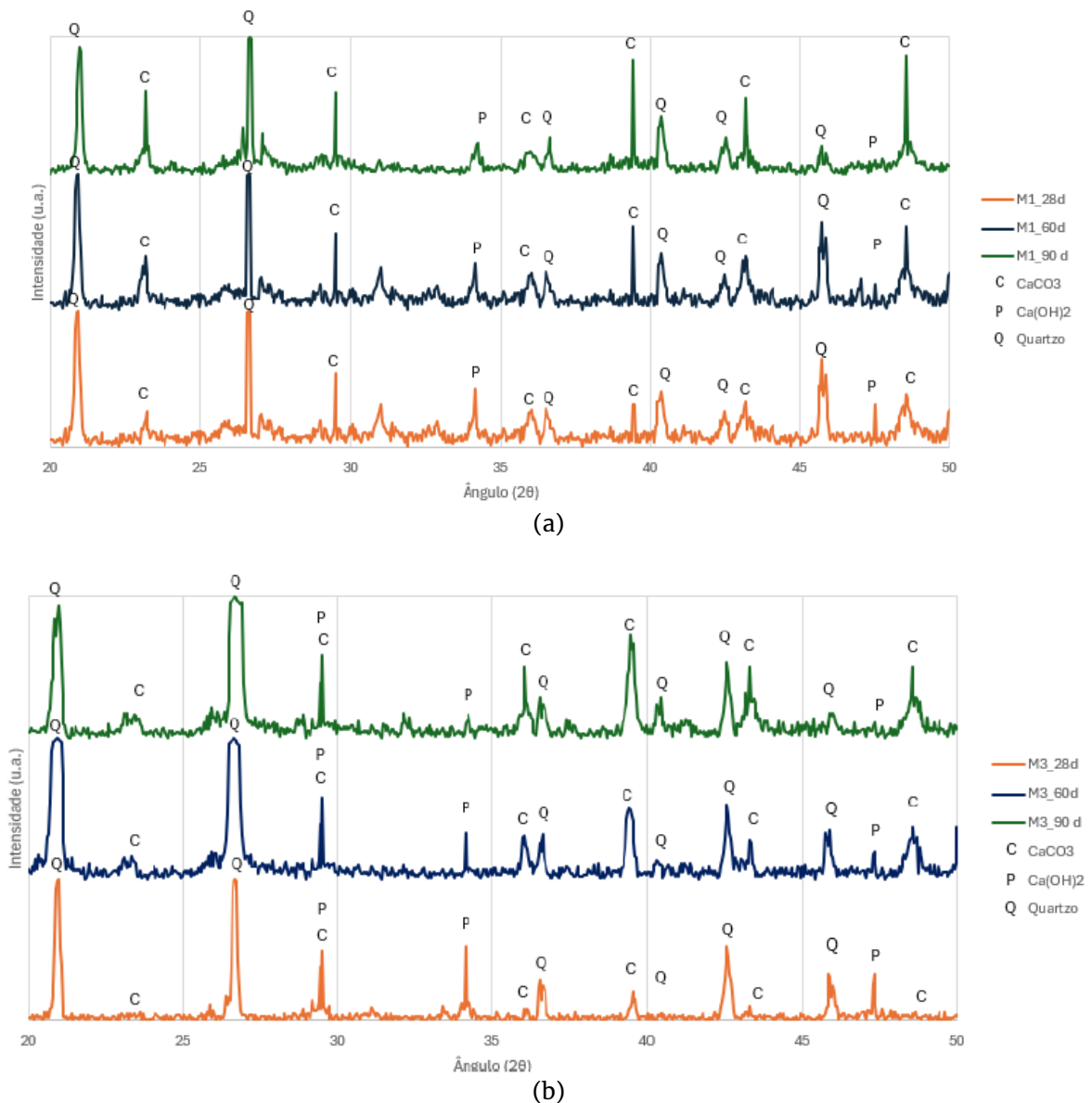


Fig. 7 | Difractogramas; (a) Composição M1; (b) Composição M3

3.3 Propriedades físicas

3.3.1 Porosidade aberta

Os valores médios de porosidade aberta obtidos para as diferentes composições de argamassas, bem como para os três tempos de cura, encontram-se apresentados na Fig. 8a. Observa-se que a porosidade das amostras diminui com o aumento da percentagem de gesso incorporado, conforme evidenciado pelos valores registados para as misturas M1, M2, M3 e M4 aos 28 dias de cura. A porosidade aberta corresponde à fração da porosidade da microestrutura do material que é acessível à água, permitindo a absorção de líquidos e gases.

De acordo com a literatura, o gesso, devido à sua estrutura cristalina distinta da cal, pode preencher os espaços intersticiais entre as partículas de cal, conduzindo a uma redução do volume total de poros. Os cristais de gesso atuam como material de preenchimento, ocupando os vazios existentes entre a cal e os agregados, contribuindo para o desenvolvimento de uma microestrutura mais compacta [24-25].

Verifica-se ainda que, para uma mesma composição, a porosidade aberta apresenta uma tendência decrescente com o aumento do tempo de cura (28, 60 e 90 dias). Esta variação é mais evidente na argamassa de cal (M1), cuja porosidade diminui de 31,98% aos 28 dias para 30,26% aos 90 dias. Esta evolução pode ser associada ao processo de cura da argamassa de cal, dominado pela carbonatação do hidróxido de cálcio e consequente precipitação de carbonato de cálcio, o que conduz à progressiva densificação da estrutura porosa. Por outro lado, a variação da porosidade aberta com o tempo de cura torna-se menos significativa à medida que aumenta a percentagem de gesso incorporado. No caso da composição M4, observa-se praticamente uma estabilização da porosidade ao longo do tempo de cura, indicando que a presença de gesso reduz a influência dos processos de cura tardia na evolução da microestrutura porosa.

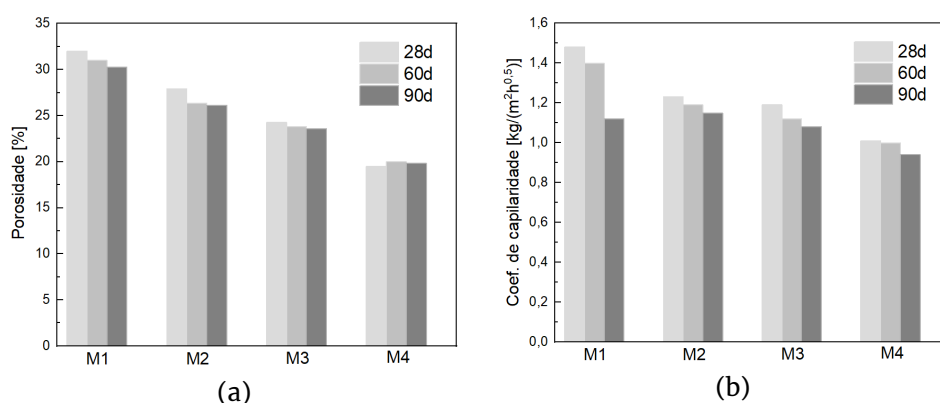


Fig. 8 | Propriedades físicas: (a) porosidade aberta; (b) coeficiente de absorção por capilaridade

3.3.2 Coeficiente de absorção por capilaridade

Os valores médios do coeficiente de absorção de água por capilaridade, obtidos no ensaio de absorção por capilaridade, encontram-se apresentados na Fig. 8b. Observa-se que o coeficiente de absorção é mais elevado na argamassa de cal (M1) e inferior nas argamassas com incorporação de gesso (M2, M3 e M4). Estes resultados indicam que as argamassas de cal, que apresentam maiores

valores de porosidade aberta, evidenciam também uma maior conectividade entre poros e/ou a presença de poros de menor diâmetro, fatores que favorecem uma absorção capilar mais elevada quando comparadas com as misturas contendo cal e gesso.

Nas argamassas de cal e gesso (M2, M3 e M4), verifica-se uma diminuição progressiva do coeficiente de absorção por capilaridade com o aumento do teor de gesso. Este comportamento pode ser explicado pela redução da porosidade capilar, eventualmente associada a um aumento do diâmetro médio dos poros e a uma diminuição da porosidade aberta total. Uma menor porosidade implica um número reduzido de poros capilares ativos para a entrada de água, resultando numa menor capacidade de absorção por capilaridade.

Para além da redução do coeficiente de absorção por capilaridade nas misturas de cal e gesso relativamente à argamassa de cal de referência, observa-se também que o coeficiente de absorção diminui com o aumento do tempo de cura. Esta redução da capilaridade está associada ao processo de carbonatação da cal, que promove alterações progressivas na microestrutura da argamassa, nomeadamente a densificação da matriz e a redução da conectividade da rede porosa ao longo do tempo de cura.

3.4 Propriedades mecânicas

A resistência à flexão foi avaliada em todas as misturas aos 28, 60 e 90 dias de cura, através do ensaio de flexão descrito anteriormente. Para cada composição e idade de cura, foram ensaiados três provetes prismáticos com dimensões de $4 \times 4 \times 16$ cm. A Fig. 9a apresenta os valores médios da resistência à flexão obtidos para as diferentes misturas e idades de cura.

Os resultados evidenciam um aumento da resistência à flexão com o incremento do teor de gesso incorporado nas argamassas. Verifica-se que, quanto maior a percentagem de gesso, maior é a resistência à flexão das amostras. Este comportamento pode ser atribuído à elevada capacidade de ligação do gesso, que promove um aumento da coesão interna da argamassa, conduzindo a uma microestrutura mais densa e contínua, com maior resistência às solicitações de tração [26]. Adicionalmente, o aumento do teor de gesso está associado a uma redução significativa da porosidade, refletindo uma microestrutura mais compacta e, consequentemente, mais resistente à flexão.

A resistência à compressão foi avaliada em todas as misturas de argamassa e após os 28, 60 e 90 dias de idade. Para este efeito, foram utilizados os prismas resultantes dos ensaios de flexão dos diferentes tipos de argamassas (6 provetes). Na Fig. 9b apresentam-se os resultados das diferentes amostras e para as diferentes idades. Os resultados evidenciam a influência significativa do teor de gesso e do tempo de cura no comportamento mecânico das argamassas. Observa-se um aumento progressivo da resistência à compressão com o tempo de cura para todas as misturas, associado aos processos de carbonatação da cal e à consequente densificação da matriz. As argamassas com incorporação de gesso apresentam valores de resistência superiores aos da argamassa de referência (M1), sendo este efeito mais pronunciado nas misturas com maior teor de gesso (M3 e M4). A presença de gesso contribui para o desenvolvimento de uma microestrutura mais compacta e menos porosa, promovendo

resistências iniciais mais elevadas. Por outro lado, o ganho de resistência ao longo do tempo é mais expressivo na argamassa de cal, devido à maior contribuição da carbonatação, enquanto nas misturas com gesso este efeito é menos acentuado.

Estes resultados confirmam a relação inversa entre porosidade e resistência à compressão, bem como o papel complementar da hidratação do gesso e da carbonatação da cal no desenvolvimento das propriedades mecânicas das argamassas.

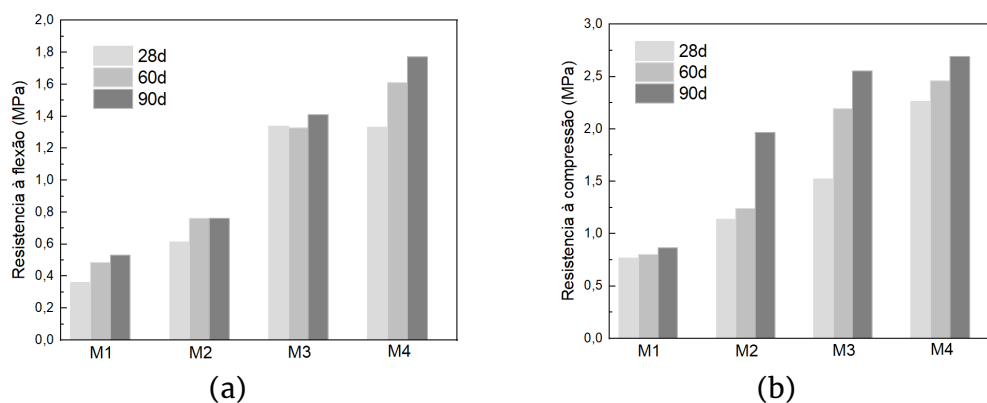


Fig. 9 | Propriedades mecânicas: (a) resistência à flexão; (b) resistência à compressão

5- CONCLUSÕES

A incorporação de gesso nas argamassas de cal tem uma influência significativa nas suas propriedades físicas e mecânicas, tanto nas idades iniciais como ao longo do tempo de cura. Do ponto de vista físico, a adição de gesso conduz a uma redução da porosidade aberta e da conectividade capilar nas idades iniciais, o que se traduz numa diminuição do coeficiente de absorção de água por capilaridade. Este efeito está associado à modificação da microestrutura, resultando numa matriz mais compacta e menos permeável.

Em termos mecânicos, o aumento do teor de gesso promove um acréscimo da resistência à flexão e à compressão, particularmente nas idades iniciais, evidenciando o papel da hidratação do gesso no desenvolvimento precoce da resistência. As misturas com maior teor de gesso apresentam valores de resistência superiores aos da argamassa de cal de referência, em consonância com a redução da porosidade e o aumento da coesão interna da matriz.

Com o avanço do tempo de cura, observa-se um aumento generalizado das resistências mecânicas em todas as misturas, associado principalmente à carbonatação da cal. No entanto, o ganho de resistência ao longo do tempo é mais pronunciado na argamassa sem gesso, enquanto nas argamassas com gesso este efeito é menos significativo, refletindo a menor contribuição da carbonatação devido à redução do teor de cal disponível.

De um modo geral, os resultados confirmam a relação inversa entre porosidade e desempenho mecânico, bem como o efeito benéfico do gesso na melhoria das propriedades físicas e mecânicas das argamassas de cal, sobretudo nas idades iniciais. Contudo, a possível instabilidade microestrutural do gesso em idades mais avançadas sugere que a otimização do seu teor é fundamental para garantir um equilíbrio adequado entre durabilidade e desempenho mecânico.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela FCT/MCTES no âmbito da Unidade de I&D Instituto para a Sustentabilidade e Inovação em Estruturas de Engenharia (ISISE), com as referências UID/4029/2025 (<https://doi.org/10.54499/UID/04029/2025>) e UID/PRR/04029/2025 (<https://doi.org/10.54499/UID/PRR/04029/2025>), e no âmbito do Laboratório Associado Produção Avançada e Sistemas Inteligentes ARISE com a referência LA/P/0112/2020.

REFERÊNCIAS

- [1] Lanas, J., Alvarez, J.L. (2003). Masonry repair lime-based mortars: Factors affecting the mechanical behavior, *Cement and Concrete Research*, 33, 1867–1876.
- [2] Cuevasa, K., Wendlandb, D., Winnefeldc, F., Stephan, D. (2025). Chemical, Mineralogical and Mechanical Characterization of Ancient Roman Concrete and Mortar: A Review, *International journal of architectural heritage*, 19 (1), 1–25.
- [3] Van Balen, K. (2005). Carbonation reaction of lime, kinetics at ambient temperature, *Cement and Concrete Research* 35, 647–657.
- [4] Velosa, A. L., J. Coroado, M. D. R. Veiga, F. Rocha. (2007). Characterization of roman mortars from Conímbriga with respect to their repair. *Materials Characterization*, 58, 1208–16.
- [5] Damas, A.L., Veiga, M.R., Faria, P. (). Caracterização de argamassas antigas de Portugal – Contributo para a sua correta conservação, Congresso Ibero-Americano “Património, suas Matérias e Imatérias”, M. Menezes, J. Delgado Rodrigues, D. Costa (Eds.), ID: 67_021.
- [6] Moropoulou, A., Bakolas, A., Bisbikou, K. (2000). Investigation of the technology of historic mortars, *Journal of Cultural Heritage*, 1, 45–58.
- [7] Moropoulou, A., Bakolas, A., Anagnostopoulou, S. (2005) Composite materials in ancient structures, *Cement and Concrete Composites*, 27, 295–300.
- [8] Vitti, P. (2021). Mortars and masonry—structural lime and gypsum mortars in Antiquity and Middle Ages, *Archaeological and Anthropological Sciences*, 13: 164.
- [9] Bel-Anzué, Elert, K. (2021). Changes in traditional building materials: the case of gypsum in Northern Spain *Archaeological and Anthropological Sciences* 13: 177.
- [10] La Spin, V., Giménez, C.J.G. (2020). Uses of Gypsum in Spanish architectural heritage: Typologies and some unique construction techniques, *International Journal of Architectural Heritage*, 14(2), 176-195.
- [11] Naciri, K., Aalil, I, Chaaba, A. (2002). Eco-friendly gypsum-lime mortar with the incorporation of recycled waste brick, *Construction and Building Materials* 325, 126770.
- [12] Romera, J.I., Martínez-Ramírez, S., Lapuente, P., Blanco-Varela, M.T. (2013). Assessment of the physico-mechanical behaviour of gypsum-lime repair mortars as a function of curing time, *Environ Earth Sci*, 70:1605–1618.

- [13] Freire, M.T., Veiga, M.R., Santos Silva, A., Brito, J. (2021). Restoration of ancient gypsum-based plasters: Design of compatible materials, *Cement and Concrete Composites*, 120, 104014.
- [14] Silveira Paulo, M., M.R., Brito, J. (2007). Gypsum coatings in ancient buildings, *Construction and Building Materials*, 21 (1), 126-131.
- [15] Alves, A. (2025). Desenvolvimento de argamassas de cal com incorporação de gesso para restauro e conservação de estruturas históricas, Tese de Mestrado, Universidade do Minho, pp. 101.
- [16] EN 1015-1 - Methods of test for mortar for masonry – Part 1 - Determination of particle size distribution (by sieve analysis), 1999.
- [17] EN 1015-3- Methods of test for mortar for masonry – Part 3 – Determination of consistence of fresh mortar (by flow table), 2004.
- [18] EN 1015-2- Methods of test for mortar for masonry – Part 2 – Bulk sampling of mortars and preparation of test mortars, 1999.
- [19] EN 1015-11. Methods of test for mortars for masonry- Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, 1999.
- [20] EN 1936 – Natural stone test methods – Determination of real density and apparent density and of total and open porosity, 1909.
- [21] EN 1015-18 - Methods of test for mortar for masonry - Part 18: Determination of water absorption coefficient due to capillary action of hardened mortar, 2002.
- [22] A. Bakolas et al., (1995). Thermoanalytical research on traditional mortars in Venice, *Thermochim. Acta*, 269–270, 817–828.
- [23] Cizer, Ö., Rodriguez-Navarro, C., Ruiz-Agudo, E., Elsen, J., Van Gemert, D., Van Balen, K. (2012). Phase and morphology evolution of calcium carbonate precipitated by carbonation of hydrated lime, *Journal of Materials Science*, 47(16), 6151–6165.
- [24] Rodriguez-Navarro, C., Ilic, T., Ruiz-Agudo, E., Elert, K. (2023). Carbonation mechanisms and kinetics of lime-based binders: An overview, *Cement and Concrete Research*, 173, 107301.
- [25] Lawrence, R. M., Mays, T. J., Rigby, S. P., Walker, P., D’Ayala, D. (2007). Effects of carbonation on the pore structure of non-hydraulic lime mortars. *Cement and Concrete Research*, 37(7), 1059–1069.
- [26] Elert, K., Alaminos, R.A., Benavides-Reyes, C., Burgos-Ruiz, M. (2023). The effect of lime addition on weathering resistance and mechanical strength of gypsum plasters and renders, *Cement and Concrete composites*, 139, 105012.