



## IMPACTO DO ENVELHECIMENTO NATURAL NAS PROPRIEDADES DAS ARGAMASSAS DE CAL – CASO DE ESTUDO

Ana Rita Santos<sup>a</sup>; Maria do Rosário Veiga<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, [arsantos@Inec.pt](mailto:arsantos@Inec.pt)

<sup>b</sup> Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Av. do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, [rveiga@Inec.pt](mailto:rveiga@Inec.pt)

### RESUMO

No âmbito do Projeto EEA Grants - Culture Programme 2014-2021 “Coastal Memory Fort”, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil desenvolveu e caracterizou diversas soluções de argamassas de revestimento, respeitando os critérios de compatibilidade e autenticidade com os materiais originais existentes, de modo a fornecer uma base para seleccionar a formulação de argamassas de reparação a adotar na reabilitação do Forte de Nossa Senhora dos Anjos de Paimogo, no concelho da Lourinhã.

As argamassas de revestimento do Forte estão sujeitas a condições ambientais e climáticas muito severas. Estes fatores são de difícil reprodução em laboratório, o que torna desejável uma avaliação em condições reais de aplicação. Para o efeito, foram aplicadas, em painéis experimentais, em muros do Forte de Paimogo, seis soluções de revestimento, à base de cal área, com o intuito de avaliar os efeitos do envelhecimento natural no desempenho físico-mecânico e na durabilidade destas argamassas. Para tal, foi realizado um acompanhamento e monitorização, através de ensaios *in situ*, dessas aplicações.

Nesta comunicação, apresenta-se a metodologia adotada na avaliação do desempenho e discutem-se os resultados obtidos, em conjunto com as características obtidas em ensaios laboratoriais. Finalmente, selecciona-se a solução a recomendar para a reabilitação do Forte.

**Palavras-chave:** Argamassas, Forte, Reabilitação, Desempenho, Durabilidade



## 1 INTRODUÇÃO

Localizado na encosta da Praia de Paimogo, no concelho da Lourinhã, o Forte de Nossa Senhora dos Anjos de Paimogo, mais conhecido por Forte de Paimogo está classificado como Imóvel de Interesse Público desde 1957. Concebido para defender a linha costeira a norte de Lisboa, que se desenvolvia desde o Forte de Peniche até Cascais, foi edificado no século XVII (a partir de 1674), integrando a segunda linha de defesa da barra do Rio Tejo (SIPA, 2023).

O Forte, como outras construções edificadas ao longo da linha costeira, está sujeito a um ambiente húmido e salino, assim como a condições climáticas muito agressivas, tais como ventos fortes transportando sais, elevadas amplitudes térmicas, intensa radiação solar e muitos ciclos de molhagem/secagem. Os revestimentos, que têm como função principal proteger as alvenarias, são particularmente expostos a estas ações exteriores, e portanto, em geral, os primeiros a apresentar sinais de degradação (Figura 1).



Figura 1 – Forte de Paimogo e o elevado nível de degradação dos rebocos exteriores (2023)

O estudo dos revestimentos e as ações de conservação e restauro do Património edificado tem adquirido nas últimas décadas grandes avanços técnicos e científicos. A conservação dos materiais originais sempre que tal se verifica possível e a seleção adequada das técnicas construtivas aliada à utilização de materiais com características idênticas aos originais, permitem preservar a autenticidade dos edifícios históricos, mas também permitem um desempenho adequado a longo prazo e a durabilidade de todo o conjunto.

No âmbito do Projeto EEA Grants - Culture Programme 2014-2021 “Coastal Memory Fort”, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, I.P. desenvolveu e caracterizou diversas soluções de argamassas de revestimento, respeitando os critérios de compatibilidade e autenticidade com os materiais originais existentes, de modo a constituir uma base para a seleção da formulação de argamassas de reparação a adotar na reabilitação do Forte de Paimogo.

As ações realizadas iniciaram por um registo das composições e características das alvenarias e argamassas que integram o edifício (Veiga *et al.*, 2022). Deste registo concluiu-se que as alvenarias originais são constituídas por blocos de pedra (arenitos compactos e calcários negros) de dimensões variáveis e baixa absorção de água. As argamassas originais do Forte são argamassas de cal aérea e areias siliciosas lavadas, com traços ricos em cal. As argamassas são também elas ricas em elementos coníferos e areias calcárias, compatíveis com o ambiente geológico do Forte. Foram igualmente encontrados nódulos de cal de dimensão significativa. Verificou-se que as argamassas de revestimento originais se encontram sãs dos pontos de vista químico e físico, com resistências elevadas e permeabilidades à água moderadas (Veiga *et al.*, 2022), concluindo-se que são muito duráveis e adequadas às condições locais. Como tal, foram tomadas como referência para a formulação e seleção



das soluções de revestimento a adotar na intervenção a realizar. Na sequência da ação anteriormente preconizada, foi desenvolvida uma metodologia de análise de diversas formulações de argamassas com materiais compatíveis aos originais. Esta metodologia envolveu, numa primeira fase, uma extensa campanha laboratorial (Santos e Veiga, 2023, Santos *et al.*, 2023), e posteriormente, após seleção de um conjunto de formulações estudadas na primeira fase, análise do desempenho destas quando expostas às condições climáticas e ambientais do Forte (Veiga e Santos, 2023), uma vez que as condições ambientais severas a que as argamassas irão estar sujeitas, e até mesmo o tipo de suporte e as técnicas construtivas, são fatores de difícil reprodução em condições laboratoriais, o que torna desejável, sempre que possível, uma avaliação em condições reais de aplicação em paralelo com uma avaliação mais detalhada em laboratório.

Para o efeito, foram aplicadas, em painéis experimentais, à escala real, em muros do Forte de Paimogo, seis soluções de revestimento, à base de cal área, com o intuito de avaliar os efeitos do envelhecimento natural no desempenho físico-mecânico e na durabilidade destas argamassas. Para tal, foi realizado um acompanhamento e monitorização, através de ensaios *in situ*, destas aplicações. A decisão sobre a solução a recomendar para aplicação na obra de reabilitação do Forte de Paimogo foi tomada tendo como base o desempenho das argamassas nas aplicações *in situ* e em toda a campanha laboratorial.

## 2 TRABALHO EXPERIMENTAL

### 2.1 DEFINIÇÃO DA COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS

Com o objetivo de avaliar os efeitos do envelhecimento natural de, aproximadamente, um ano, no desempenho físico-mecânico e na durabilidade das argamassas de revestimento, foram selecionadas quatro composições de argamassa a aplicar em painéis experimentais à escala real (Ca+Cv30%:M<sub>2</sub>, Ca+Cv30%:M<sub>3</sub>, Ci:Ca:M<sub>2</sub> e Ci:Ca:M<sub>3</sub>), que se considerou terem apresentado globalmente os melhores desempenhos na fase anterior do projeto (Santos *et al.*, 2023a e b; Veiga e Santos, 2023), tendo em conta o tipo de suporte e as condições de cura a que as argamassas de reparação vão estar sujeitas no Forte. Adicionalmente foram selecionadas mais duas composições de argamassa, idênticas às anteriores, mas apenas com cal aérea apagada como ligante (Ca:M<sub>2</sub> e Ca:M<sub>3</sub>), que foram consideradas como referência para análise dos resultados obtidos.

A composição das soluções selecionadas para aplicação *in situ*, assim como as características dos materiais utilizados descrevem-se no Quadro 1 e no Quadro 2, respetivamente.

Quadro 1 – Composição das argamassas em estudo

Composição		Traço (vol.)	Razão água/ligante
Ca+Cv30%:M <sub>2</sub>	Cal aérea + cal viva 30% (% vol. cal) + mistura de areia M <sub>2</sub> <sup>*</sup>	(1:0,3):(2,3:0,3)	1,6
Ca+Cv30%:M <sub>3</sub>	Cal aérea + cal viva 30% (% vol. cal) + mistura de areia M <sub>3</sub> <sup>+</sup>	(1:0,3):(2,5:0,1)	1,6
Ci:Ca:M <sub>2</sub>	Cimento + Cal aérea + mistura de areia M <sub>2</sub> <sup>*</sup>	1:3:(10,8:1,2)	1,7
Ci:Ca:M <sub>3</sub>	Cimento + Cal aérea + mistura de areia M <sub>3</sub> <sup>+</sup>	1:3:(11,4:0,6)	1,8
Ca:M <sub>2</sub>	Cal aérea + mistura de areia M <sub>2</sub> <sup>*</sup>	1:(1,8:0,2)	1,7
Ca:M <sub>3</sub>	Cal aérea + mistura de areia M <sub>3</sub> <sup>+</sup>	1:(1,9:0,1)	1,7

\* mistura de areia M<sub>2</sub>: 90% areia de rio Tejo, d = 0/4 mm + 10% areia calcária, d = 0/1mm;

+ mistura de areia M<sub>3</sub>: 95% areia de rio Tejo, d = 0/4 mm + 5% areia calcária, d = 0/1mm.



Quadro 2 – Características dos materiais utilizados na composição das argamassas de reboco

Material	Sigla	Identificação	Baridade (kg/m <sup>3</sup> )
Ligante	Ca	Cal aérea cálcica hidratada em pó_CL90-S, Lusical (H100)	359
	Cv	Cal aérea cálcica viva micronizada_CL90-Q (R5, P2), Lusical	729
	Ci	Cimento Portland branco_CEM II/B-L 32.5R, Secil	926
Areia	M <sub>2</sub>	Mistura de Areia (90% Areia de Rio Tejo 0/4mm e 10% Areia Calcária 0/1mm)	1479
	M <sub>3</sub>	Mistura de Areia (95% Areia de Rio Tejo 0/4mm e 5% Areia Calcária 0/1mm)	1470

## 2.2 APLICAÇÃO *IN SITU*

As soluções selecionadas foram preparadas *in situ* e aplicadas em painéis com dimensões aproximadas de 1,00 x 1,60 m cada um, num muro circundante do Forte, com uma orientação solar Oeste (Figura 2) (figura 2). Todas as aplicações foram executadas por técnicos da Câmara Municipal da Lourinhã acompanhados por técnicos do LNEC e durante o período em que decorreram as aplicações (agosto de 2022) observaram-se condições atmosféricas caracterizadas, em geral, por tempo soalheiro ( $22 \pm 2^\circ\text{C}$ ) e seco (humidade relativa aproximada de 65%), com leve brisa de vento (windguru.cz).

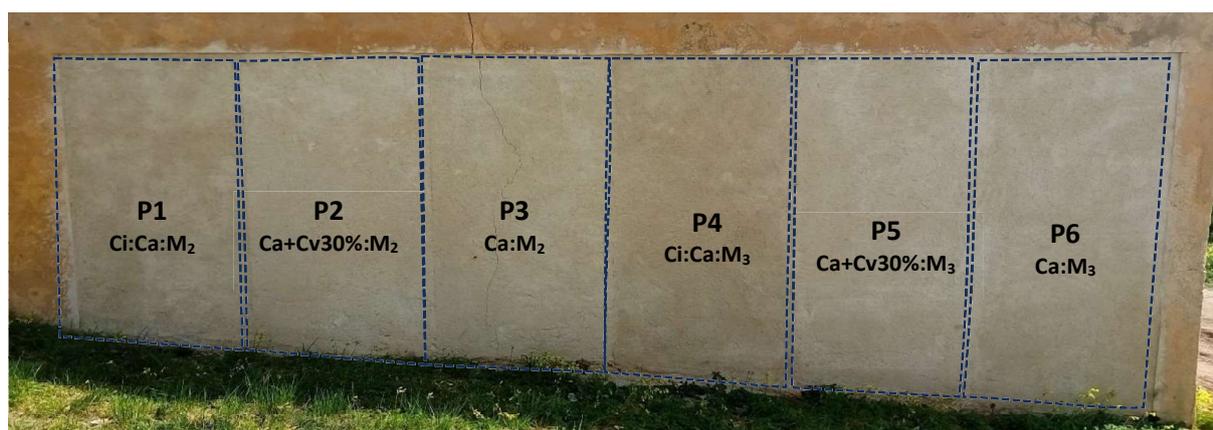


Figura 2 – Aspeto geral e identificação dos painéis após a aplicação das camadas de reboco

Previamente ao reboco foi aplicado um chapisco (24 horas antes), de modo a garantir uma melhor aderência do reboco ao suporte. Para não introduzir mais variáveis na análise do desempenho, a composição do chapisco foi idêntica à do reboco, mas com teores de água mais elevados. O reboco foi depois aplicado em duas camadas, sendo a primeira para uniformizar a superfície para a camada subsequente. A 1ª camada de reboco apresentou uma espessura variável entre 1,0 e 3,0 cm e a 2ª camada de reboco foi de  $1,5 \pm 0,5$  cm. Posteriormente, foi ainda aplicada uma camada de acabamento, não pigmentada em metade do painel e pigmentada na outra metade, com a mesma composição usada para as camadas de reboco, no entanto, a areia siliciosa (areia do Rio Tejo) foi utilizada com uma granulometria inferior a 1 mm, com uma espessura de  $0,5 \pm 0,2$  cm.

Nas aplicações tiveram-se os seguintes cuidados:

- antes da aplicação de cada camada procedeu-se à limpeza da superfície e humedecimento da camada anterior;
- as argamassas foram aplicadas com o mínimo de água de amassadura necessária para uma trabalhabilidade adequada, para evitar uma porosidade e retração excessivas (Quadro 1);



- cada camada de argamassa foi aplicada com colher de pedreiro, apertada com talocha ou com colher de pedreiro e de seguida sarrafada com régua metálica;
- em todos os painéis, foi respeitado um tempo de secagem de cerca de uma semana entre a 1ª e a 2ª camada de reboco. O chapisco foi aplicado 24 horas antes da aplicação da 1ª camada de reboco. A camada de acabamento só foi aplicada vários meses depois (aproximadamente 260 dias após o início das aplicações), porque se pretendeu avaliar previamente o comportamento das primeiras camadas.

Durante as aplicações não foram registadas quaisquer anomalias nas argamassas, tendo estas apresentado um bom aspeto final, após a aplicação. De salientar, a presença de uma fenda em profundidade do suporte na zona onde foi efetuado o painel P3 (Ca:M<sub>2</sub>).

## 2.3 METODOLOGIA ADOTADA

Para o cumprimento do objetivo estabelecido, numa primeira fase, foram definidas e preparadas diversas formulações de argamassa, numa campanha experimental realizada em laboratório (Santos *et al.*, 2023a e b; Veiga e Santos, 2023); os resultados dos ensaios físico-mecânicos obtidos nesta fase permitiram, numa fase posterior, a seleção de quatro formulações para aplicação em painéis experimentais à escala real em muros do Forte e a comparação desses resultados com os obtidos *in situ*. Adicionalmente foram aplicadas mais duas composições de argamassa, com apenas cal aérea apagada como ligante, que foram consideradas como referência para análise dos resultados obtidos.

### 2.3.1 Análise *In Situ*

A monitorização do desempenho das argamassas aplicadas nos painéis experimentais foi realizada entre setembro de 2022 (28 dias após a aplicação da 2ª camada de reboco) e agosto de 2023. Durante a campanha de ensaios, para além das observações visuais e registo fotográfico, foram também realizados ensaios não destrutivos: determinação do módulo de elasticidade dinâmico com ultrassons e avaliação da dureza superficial com durómetro Shore A; após esta data, foram ainda realizados ensaios para avaliar a aderência ao suporte e a permeabilidade à água sob baixa pressão. Os métodos de ensaios utilizados estão seguidamente descritos:

- Ensaio com durómetro (Figura 3a) – O ensaio baseia-se nas normas NP ISO 7619 e ASTM D2240 e permite avaliar a dureza superficial do revestimento. Para a sua execução utilizou-se um durómetro Shore A, que possui na sua extremidade um pino que quando pressionado contra o material, pela ação da mola, sob carga normalizada, indica a resistência à penetração, que se traduz no movimento de um ponteiro ao longo de uma escala de 0 a 100: quanto maior o seu valor maior é a dureza e a coesão superficial.
- Ensaio com ultrassons (Figura 3b) – O ensaio foi executado segundo a norma EN 12504-4, utilizando o método indireto (os transdutores colocados na mesma superfície) com uma distância de 20 mm entre eles. No ensaio foi utilizado o aparelho Steinkamp Ultrasonic tester BP-7, para determinação da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas, com o objetivo de avaliar a compactidade e a rigidez do revestimento aplicado.
- Ensaios com tubos de Karsten (Figura 3c) – A técnica de ensaio, descrita na norma EN 16302, permite avaliar a permeabilidade à água sob baixa pressão das argamassas em estudo e consiste em medir a quantidade de água absorvida através de uma determinada área de reboco, após um período definido, empregando os tubos de Karsten.



- Ensaio de arrancamento *pull-off* (Figura 3d) – O ensaio baseia-se na norma EN 1015-12 e permite avaliar a capacidade de aderência da argamassa ao suporte. O ensaio consiste na extração, com máquina *pull-off*, de uma pastilha metálica, que é previamente colada ao revestimento. A máquina de ensaios mede a força necessária para proceder ao arrancamento da pastilha.

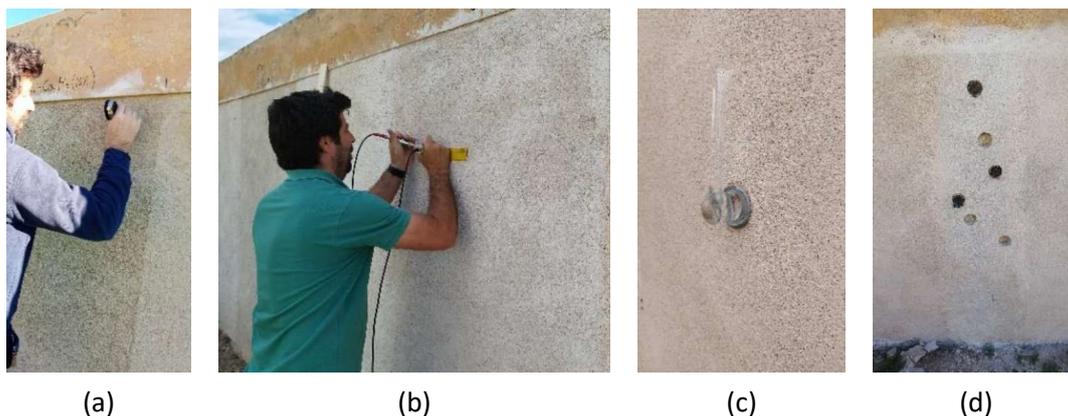


Figura 3 – Realização de ensaio *in situ*: (a) dureza superficial; (b) módulo de elasticidade dinâmico com ultrassons; (c) permeabilidade à água sob baixa pressão; (d) aderência ao suporte

### 2.3.2 Análise laboratorial

Previamente às aplicações *in situ*, as composições selecionadas (Quadro 1) foram preparadas em laboratório, de acordo com a norma europeia EN 1015-2; contudo, com a utilização de uma elevada percentagem de cal viva nas formulações das argamassas Ca+Cv30%:M<sub>2</sub> e Ca+Cv30%:M<sub>3</sub>, foi necessário adequar o método normalizado de mistura, uma vez que, após alguns minutos da amassadura, estas composições perdiam a sua plasticidade e trabalhabilidade, tornando a sua aplicação muito difícil (Santos *et al.*, 2023a e b). Após a moldagem das argamassas em moldes normalizados (40 × 40 × 160 mm), estes foram colocados em sala condicionada a 20 ± 2 °C de temperatura e 65 ± 5% de humidade relativa, durante os primeiros 7 dias, sendo que nos primeiros três dias as argamassas foram sujeitas a uma aspersão diária com água. Após este período, as argamassas foram retiradas dos moldes normalizados e deixados nas mesmas condições higrotérmicas até à data de ensaio.

A água a adicionar em cada mistura de argamassa foi determinada com base em testes práticos de aplicabilidade, como a necessária para garantir uma trabalhabilidade adequada para uma argamassa de revestimento. Após a definição do teor de água de amassadura por este método, foi fixado para cada mistura o teor de água e o espalhamento correspondente, que passaram a ser usados para toda a campanha experimental (Quadro 1).

A caracterização laboratorial efetuada às argamassas no estado endurecido, sobre provetes prismáticos (40x40x160 mm), aos 28, aos 90 e aos 180 dias, consistiu na avaliação das resistências mecânicas, através dos ensaios de resistência à tração por flexão e à compressão, segundo as especificações da norma europeia EN 1015-11, e na determinação do módulo de elasticidade dinâmico por frequência de ressonância, descrito na norma NP EN 14146. O grau de compacidade das argamassas foi determinado através do ensaio de porosidade aberta (NP EN 1936). O comportamento hídrico das argamassas foi avaliado através dos ensaios de absorção de água por capilaridade (EN 15801) e de secagem (EN 16322).



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 ANÁLISE *IN SITU*

##### 3.1.1 Observação visual

Aproximadamente 28 dias após a aplicação da 2ª camada de reboco (setembro de 2022), a observação dos rebocos aplicados mostrou, em todos os casos, um bom aspeto geral, sem fissuras, empolamentos ou outros defeitos visíveis. Apenas foi verificada na zona superior do Painel 2 (Ca+CV30%:M<sub>2</sub>) o surgimento de alguma fissuração por retração cuja maior abertura registada foi de 0,85 mm (Figura 4).

Ao fim de 145 dias (janeiro de 2023), após um período de chuva intensa, todos os painéis continuavam com um bom aspeto geral. No entanto, registou-se a presença de microrganismos, nomeadamente na zona superior do painel Ca:M<sub>3</sub> e o aparecimento de uma fissura no painel P3 (Ca:M<sub>2</sub>), com o mesmo desenvolvimento e extensão da fenda já registada no suporte, cuja maior abertura registada foi de 1,30 mm (Figura 5). A fissuração observada anteriormente no Painel 2 (Ca+CV30%:M<sub>2</sub>), manteve-se inalterada. Nos restantes dias de monitorização (março, abril, maio, junho e agosto de 2023) não foram registadas quaisquer anomalias, falta de coesão ou desenvolvimento da fissuração já observada nas camadas de reboco.

Em maio de 2023 foi aplicada a camada de acabamento em cada um dos painéis (pigmentada e não pigmentada), tendo-se verificado, após a aplicação, que o aspeto final de todos os painéis era bom, sem fissuração nem pulverulência, embora com manchas visíveis na camada de acabamento pigmentada na altura da realização dos primeiros ensaios (aproximadamente 7 semanas após a sua aplicação); contudo, verificou-se que as manchas não comprometem o desempenho das argamassas e mantiveram-se inalteradas até agosto (Figura 6).

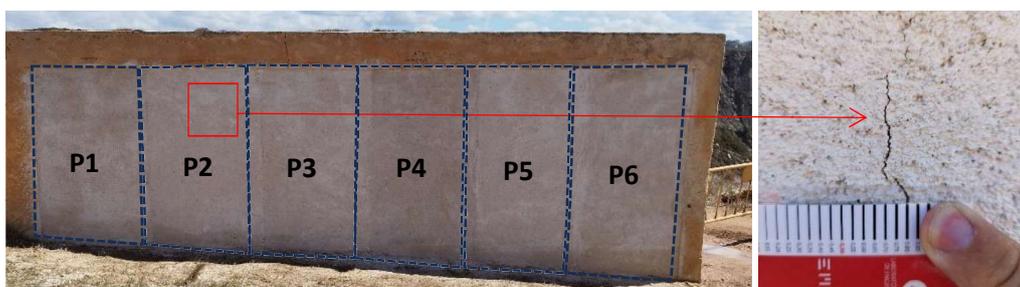


Figura 4 – Fissuração observável na 2ª camada de reboco da argamassa Ca+CV30%:M<sub>2</sub>

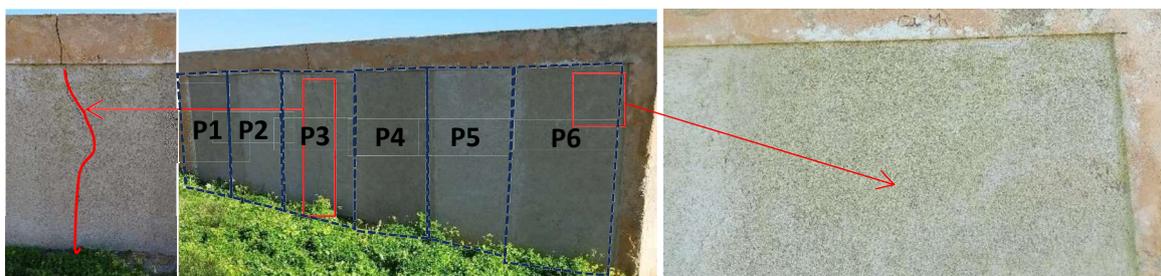


Figura 5 – Presença de microrganismo, visíveis na superfície dos rebocos, nomeadamente nas argamassas Ca:M<sub>2</sub> e Ca:M<sub>3</sub> e o surgimento da fissura no reboco Ca:M<sub>2</sub>

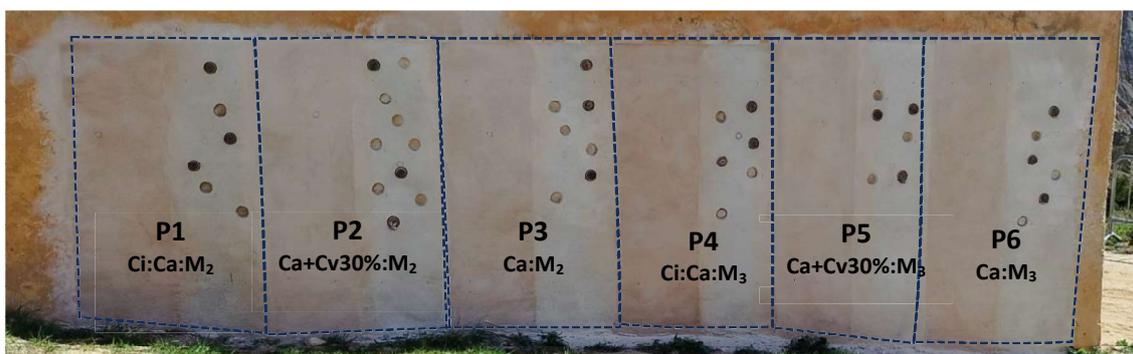


Figura 6 – Aspeto final dos painéis em agosto de 2023

### 3.1.2 Desempenho físico-mecânico

Os resultados dos ensaios realizados sintetizam-se no Quadro 3.

Quadro 3 – Síntese dos resultados obtidos nos painéis

Painel	Sobre o reboco (2 camadas)										Sobre o acabamento não pigmentado				
	Setembro 2022		Janeiro 2023		Março 2023		Abril 2023		Maio 2023		Junho 2023		Agosto 2023		
	ME_US	D	ME	D	ME	D	ME	D	ME	D	ME	D	ME	D	$\sigma$ (Tip. Rotura)
P3 Ca:M2	3005	84	3691	82	4052	80	3589	84	588	83	1400	82	1600	86	0,01 (B)
P6 Ca:M3	3870	78	4321	82	4660	80	4511	82	2856	87	2352	84	1713	81	0,03 (B)
P2 Ca+Cv30%:M2	3240	79	4242	84	3913	83	3038	87	1968	87	2481	86	3173	83	< 0,01 (B)
P5 Ca+Cv30%:M3	2179	80	4333	79	4000	86	5266	87	3540	86	3177	86	2394	86	0,01 (B)
P1 Ci:Ca:M2	5337	73	7735	80	7865	81	8059	87	3605	92	3616	83	4166	84	0,12 (B)
P4 Ci:Ca:M3	4670	82	6524	82	7454	87	5255	88	3830	85	4119	88	4169	82	0,09 (B)

ME\_US – Módulo de Elasticidade por Ultrassons (MPa); D\* – Durómetro (Shore A);  $\sigma$  - Tip. rotura - Tensão de Aderência (N/mm<sup>2</sup>) e tipologia predominante de rotura\*\*

\*Escala Durómetro (Shore A): <30 – muito fraca (perda de coesão em profundidade); 30 - 50 – fraca (perda de coesão intermédia); 50 – 70 – moderada (perda de coesão superficial); 70 - 87 – normal (bom estado de conservação); > 88 – muito dura (bom estado de conservação)

\*\*Tipologia de rotura (predominante): Padrão A – Rotura Adesiva (no plano do revestimento – suporte); Padrão B – Rotura Coesiva (no seio do revestimento); Padrão C – Rotura Coesiva (no seio do suporte).

Os resultados apresentados no Quadro 3 mostram que os valores de dureza superficial com durómetro Shore A apresentam, em geral, a mesma ordem de grandeza para todas as composições, com um ligeiro aumento com aplicação do acabamento, quando comparada com as argamassas de reboco com a mesma idade (setembro 2022 vs junho 2023). Os valores são ligeiramente superiores para as argamassas com cimento na sua composição, e em geral aumentam com a utilização de 5% da areia calcária (M<sub>3</sub>) em relação às argamassas com 10% (M<sub>2</sub>), talvez devido a microfissuração provocada pela maior percentagem de finos da areia calcária.

O ensaio com ultrassons mostra, em geral, um aumento da rigidez e compacidade das argamassas com cimento (Ci:Ca) em relação às outras composições. No entanto, a elevada rigidez destas argamassas, com módulos de elasticidade superiores às argamassas originais (2960-5940 MPa) pode transmitir às alvenarias mais deformáveis tensões elevadas e assim degradá-las de forma mais rápida. Por outro



lado, as argamassas com cal viva na sua composição, aplicadas nos painéis, apresentam um desempenho mecânico bastante satisfatório com módulos de elasticidade moderados, nomeadamente a formulação com utilização de 5% da areia calcária (M<sub>3</sub>), não existindo perdas de resistência significativas ao longo do tempo de cura. Os valores de módulos de elasticidade por ultrassons são da mesma ordem de grandeza das argamassas originais exteriores (5940 MPa).

Todas as composições de argamassa, nomeadamente as que contêm cal aérea como único ligante (Ca e Ca+Cv30%), apresentam valores de aderência ao suporte reduzidos sendo o padrão de rotura predominantemente coesivo entre a primeira camada de reboco e o suporte. Os baixos valores obtidos podem ser justificados pelo baixa profundidade de carbonatação do revestimento, nomeadamente da 1ª camada de reboco, mesmo após 1 ano de aplicação (Figura 7), pelo que é previsível que as características mecânicas destes aumentem consideravelmente a longo prazo. No entanto, os valores determinados são da mesma ordem de grandeza dos valores apresentados na literatura para argamassas de renovação de cal aplicadas em alvenarias de pedra (Veiga *et al.*, 2009; Santos *et al.*, 2018 e 2020).

No que se refere ao comportamento à água (Figura 8), o ensaio de permeabilidade à água sob baixa pressão, com tubos de Karsten, mostrou que, em geral, a utilização de 10% da areia calcária (M<sub>2</sub>) reduz a absorção em relação às argamassas com 5% (M<sub>3</sub>), com exceção da argamassa de referência (Ca) onde a argamassa com 10% de areia calcária (Ca:M<sub>2</sub>) se apresenta muito mais permeável que Ca:M<sub>3</sub>, provavelmente devido à fissuração existente. A baixa permeabilidade da argamassa Ca:M<sub>3</sub> pode justificar a presença de microrganismos observados neste painel (Figura 5). As argamassas com cal viva na sua composição são as mais absorventes.

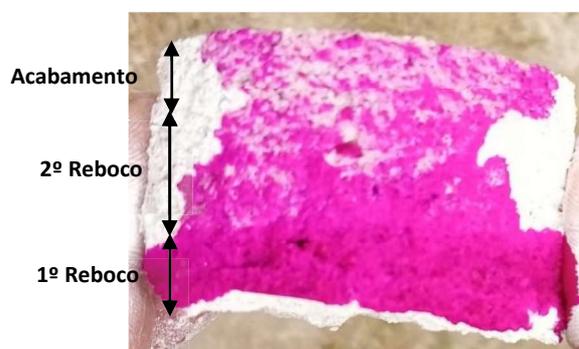


Figura 7 – Verificação da profundidade de carbonatação do revestimento, após a execução de uma carote para o ensaio de *pull-off*, com um indicador químico colorimétrico – solução de fenolftaleína (Após aspersão da superfície de fratura, é incolor para uma situação de carbonatação, e apresenta uma coloração rosada em situações de não carbonatação)

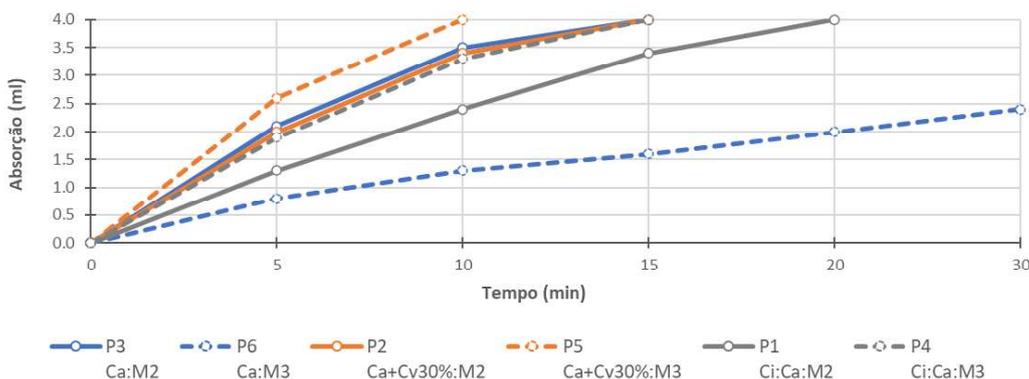


Figura 8 – Resultado médio do ensaio com os tubos de Karsten nos painéis *in situ* (não pigmentado)



### 3.2 ANÁLISE LABORATORIAL

No Quadro 4 são apresentados os resultados médios obtidos nos ensaios de laboratório sobre os provetes prismáticos das 4 argamassas de revestimento selecionadas e aplicadas *in situ*. As duas composições de argamassa, com apenas cal aérea apagada como ligante, foram apenas consideradas como referência para análise dos resultados obtidos nas aplicações *in situ*, não tendo sido estas analisadas laboratorialmente.

Quadro 4 – Propriedades físicas obtidas nas argamassas preparadas em laboratório.

Ensaio	Idade	Ca+Cv30%:M <sub>2</sub>	Ca+Cv30%:M <sub>3</sub>	Ci:Ca:M <sub>2</sub>	Ci:Ca:M <sub>3</sub>
MV (kg/m <sup>3</sup> )	28 d	1696	1697	1755	1756
	90 d	1735	1739	1773	1774
	180 d	1739	1745	1776	1771
Po (%)	28 d	28	28	28	28
	90 d	27	27	28	28
	180 d	28	27	28	28
RT (N/mm <sup>2</sup> )	28 d	0,43	0,46	0,32	0,27
	90 d	0,56	0,58	0,31	0,34
	180 d	0,68	0,67	0,35	0,33
RC (N/mm <sup>2</sup> )	28 d	0,58	0,47	0,60	0,53
	90 d	0,93	0,86	0,75	0,70
	180 d	1,27	1,41	0,71	0,73
ME_FR (MPa)	28 d	2259	2266	1988	2066
	90 d	3150	3147	2393	2480
	180 d	3547	3539	2420	2566
Durómetro* (Shore A)	28 d	87	91	86	89
	90 d	91	92	88	89
	180 d	91	90	90	91
CC (kg/m <sup>2</sup> ·min <sup>1/2</sup> )	28 d	2,0	1,9	2,9	2,9
	90 d	1,9	2,0	3,0	2,8
	180 d	1,9	1,9	3,0	2,8

MV – Massa volúmica aparente; P<sub>o</sub> – Porosidade aberta; RT – Resistência à tração por flexão; RC – Resistência à compressão; ME\_FR – Módulo de Elasticidade por frequência de ressonância; CC - Coeficiente de capilaridade

\*Escala Durómetro (Shore A): <30 – muito fraca (perda de coesão em profundidade); 30 - 50 – fraca (perda de coesão intermédia); 50 – 70 – moderada (perda de coesão superficial); 70 - 87 – normal (bom estado de conservação); > 88 – muito dura (bom estado de conservação)

Em geral, todas os provetes de argamassa apresentam um ligeiro aumento da compacidade e da resistência mecânica com o tempo de carbonatação, embora nem sempre essa variação se reflita em redução da porosidade aberta. Os resultados mecânicos (Quadro 4) indicam que todas as composições de argamassa apresentam resistências mecânicas relativamente baixas e valores moderados de módulo de elasticidade.

A adição de cimento branco à cal aérea hidratada (composições Ci:Ca) leva a um ligeiro aumento da massa volúmica das argamassas aplicadas em provetes prismáticos, no entanto com alterações pouco significativas nos valores de porosidade aberta das argamassas. Por outro lado, as argamassas com 30% de cal viva apresentam valores mais elevados de resistência mecânica que as argamassas Ci:Ca, nomeadamente a longo prazo (180 dias). Adicionalmente, dos 90 para os 180 dias, os provetes prismáticos apresentam uma evolução muito significativa em relação às composições Ci:Ca. Este bom comportamento das argamassas Ca+Cv30% vai de encontro ao defendido por alguma literatura (Loriot, 1774; Sickels-Taves e Allsopp, 2005), que afirma que a utilização de cal viva tende a aumentar a resistência mecânica das argamassas de cal aérea.



Os resultados obtidos com o Shore A, apresentam a mesma tendência, com um ligeiro acréscimo da dureza superficial nas argamassas com adição de cal viva na sua composição. No que se refere ao comportamento à água por capilaridade as argamassas em estudo apresentam valores elevados de coeficiente de capilaridade, como é típico das argamassas de cal. Contrariamente às aplicações *in situ*, as argamassas com cimento na sua composição apresentam velocidades de absorção de água superiores às argamassas com de cal viva.

A variação do teor de areia calcária de 10% (M<sub>2</sub>) para 5% (M<sub>3</sub>) na composição da argamassa tende a aumentar a sua compacidade e, conseqüentemente, as suas resistências mecânicas, assim com reduzir a absorção de água das argamassas. A maior percentagem de finos da areia calcária M<sub>2</sub>, no entanto, pode potenciar a microfissuração, o que conduz a uma diminuição do seu desempenho.

#### 4 SELECÇÃO DA ARGAMASSA DE REPARAÇÃO

Face aos resultados obtidos em laboratório e posteriormente com as aplicações à escala real em painéis experimentais, considera-se que a solução de revestimento de cal aérea + 30% de cal viva e 5% de areia calcária (Ca+Cv30%:M<sub>3</sub>), apresentou o melhor desempenho global, com resistências e deformabilidades adequadas e comportamento à água equilibrado, para este caso de estudo. Esta é também a solução mais compatível em termos composicionais com as argamassas originais. A principal desvantagem detetada desta composição foi a fraca aderência ao suporte o que pode torná-las mais vulneráveis à degradação. No entanto, verificou-se o baixo teor de carbonatação das camadas mais internas, o que pode ter contribuído para os valores mais reduzidos. Contudo, é expetável que os valores tendam a incrementar devido à progressão da carbonatação.

Assim, considera-se recomendar a solução Ca+Cv30%:M<sub>3</sub>, ao traço volumétrico de (cal aérea apagada:cal viva micronizada) : (areia siliciosa:areia calcária) (1:0,3):(2,5:0,1), como sendo a solução mais adequada para conservação das paredes exteriores do Forte. No entanto, dado que esta composição revelou aderência reduzida ao suporte, recomenda-se que a aplicação seja realizada em camadas de pequena espessura (não superior a 20 mm) e o tempo de aplicação entre a primeira camada do reboco e o chapisco seja superior a 1 semana, de modo a favorecer a carbonatação da camada mais interna.

#### 5 CONCLUSÕES

Com o intuito de selecionar as soluções de argamassas de conservação a aplicar na reabilitação do Forte de Paimogo, foi desenvolvida uma metodologia de análise que envolveu numerosos ensaios de caracterização física e mecânica de diversas composições de argamassas de revestimento, utilizando métodos e provetes normalizados, assim como a avaliação das características e da durabilidade de 6 aplicações em painéis experimentais de argamassas sujeitas a condições de exposição no ambiente do Forte.

Todas as soluções selecionadas para este estudo se regeram pelo princípio da compatibilidade com os materiais originais do Forte do ponto vista composicional (químico e mineralógico), físico e mecânico e procuraram respeitar a autenticidade material do edifício, aproximando-se o mais possível das soluções originais. Com base nas análises laboratoriais e *in situ* realizadas, conclui-se que a solução de revestimento exterior de: cal aérea hidratada + 30% de cal viva com areia siliciosa e 5% de areia calcária (Ca+Cv30%:M<sub>3</sub>) apresenta o melhor desempenho global, com resistências e deformabilidades adequadas e comportamento à água equilibrado, para este caso de estudo, sendo estas também as soluções mais aproximadas em termos composicionais às argamassas originais. No entanto, o processo



de aplicação deverá ser otimizado, com tempos de aplicação entre camadas superior ao que foi definido inicialmente.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às empresas Lhoist Portugal, Secil Argamassa, Lena Agregados e Lotevias pelo fornecimento dos materiais. Assim como à Câmara Municipal da Lourinhã que acompanhou as aplicações experimentais *in situ*. Este trabalho é uma contribuição para o projeto de Investigação e Inovação LNEC 2021-2027 “MICR - Métodos Integrados de Conservação e Reabilitação do Património Edificado” (0803/1102/24170).

## REFERENCIAS

- Loriot, A.J. (1774) Mémoire sur une découverte dans l’art de bâtir. De L’imprimerie de Michel Lambert, rue de la Harpe, près Saine Côme, Paris. Acessível online: <https://archive.org/details/mmoiresurunedcou00lori/mode/2up>, consultado em janeiro de 2023.
- Santos, A.R., Veiga, M.R., Matias, L., Santos Silva, A., de Brito, J. (2018) Durability and compatibility of lime-based mortars: the effect of aggregates Infrastructure, 3 (3): 34. <https://doi.org/10.3390/infrastructures3030034>.
- Santos, A.R., Veiga, M.R., Sabala, B. (2023a) Desenvolvimento de argamassas de substituição para o Forte de Nossa Senhora dos Anjos de Paimogo: Seleção da solução de revestimento. Relatório 280/2023 – DED/NRI.
- Santos, A.R., Veiga, M.R., Santos Silva, A. (2023b) Characterization and assessment of performance of innovative lime mortars for conservation of building heritage: Paimogo’s fort, a case study. Applied Sciences, 13, 4679. <https://doi.org/10.3390/app13084679>.
- Santos, A.R., Veiga, M.R., Santos Silva, A., de Brito, J. (2020) Tensile bond strength of lime-based mortars: The role of the microstructure on their performance assessed by a new non-standard test method, Journal of Building Engineering, 29, 2020, 101136. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.101136>.
- Sickels-Taves, L.B., Allsopp, P.D. (2005) Lime and its place in the 21st century: Combining tradition, innovation, and science in building preservation. In International Building Lime Symposium 2005, Orlando, Florida, 9 -11 de março.
- SIPA (2023) Forte no Lugar de Paimogo/Forte de Nossa Senhora dos Anjos de Paimogo. Acessível online: [http://www.monumentos.gov.pt/Site/APP\\_PagesUser/SIPA.aspx?id=6327](http://www.monumentos.gov.pt/Site/APP_PagesUser/SIPA.aspx?id=6327), janeiro 2023.
- Veiga, M.R., Santos Silva, A., Marques, A.I., Sabala, B. (2022) Caracterização das argamassas existentes no Forte de Nossa Senhora dos Anjos do Paimogo. Relatório 67/2022 – DED/NRI.
- Veiga, M.R., Santos, A.R. (2023) The challenge on development of repair mortars for historical buildings in severe marine environment: Paimogo Fort, a case study. In: Bokan Bosiljkov, V., Padovnik, A., Turk, T. (eds). Conservation and Restoration of Historic Mortars and Masonry Structures. HMC 2022. RILEM Bookseries, vol 42: 507-522. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-31472-8\\_41](https://doi.org/10.1007/978-3-031-31472-8_41).
- Veiga, M.R., Velosa, A., Magalhães, A.C (2009) Experimental applications of mortars with pozzolanic additions: characterization and performance evaluation. Construction and Building Materials, 23:318-327. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.12.003>.