

## CONSOLIDAÇÃO E REINTEGRAÇÃO CROMÁTICA DE REVESTIMENTOS HISTÓRICOS – ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE PIGMENTOS

Patrícia Pascoal<sup>1\*</sup>, Giovanni Borsoi<sup>2</sup>, Rosário Veiga<sup>2</sup> e Paulina Faria<sup>1</sup>

1: Departamento de Engenharia Civil  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Universidade Nova de Lisboa  
Quinta da Torre, 2829-516 Caparica

e-mail: p.pascoal@campus.fct.unl.pt; paulina.faria@fct.unl.pt web: <http://www.dec.fct.unl.pt>

2: Núcleo de Revestimentos e Isolamentos, Departamento de Edifícios  
Laboratório Nacional de Engenharia Civil  
Av. do Brasil, n.º106, 1700-066 Lisboa

e-mail: gborsoi@lnec.pt; rveiga@lnec.pt web: <http://www.lnec.pt>

**Palavras-chave:** produtos consolidantes, revestimentos históricos, pozolanas, reintegração cromática, pigmentos.

**Resumo.** *A consolidação de revestimentos antigos com perda de coesão acontece, geralmente, quando os mesmos apresentam um valor artístico elevado. Esta importante fase de intervenção conservativa deve ser levada a cabo através da utilização de produtos compatíveis com o revestimento; os produtos consolidantes comumente aplicados são de natureza orgânica ou inorgânica. Os produtos orgânicos, à base de resinas acrílicas, vinílicas ou silicónicas, são incompatíveis com os suportes antigos; os consolidantes mais compatíveis encontram-se no grupo dos inorgânicos, onde se inserem a água de cal e o silicato de etilo, que também se caracterizam pela maior durabilidade e reversibilidade.*

*Neste estudo, foram utilizados produtos consolidantes à base de hidróxido de cálcio, metacaulino (uma pozolana artificial), água e pigmentos inorgânicos. De facto, a água de cal, composta essencialmente por hidróxido de cálcio, é um dos consolidantes mais antigos de que se tem conhecimento; a adição do metacaulino prende-se com o facto de conferir ao produto propriedades hidráulicas, aumentando a sua resistência mecânica e durabilidade; a adição dos pigmentos inorgânicos pretende avaliar a viabilidade da reintegração cromática e também verificar a sua influência na consolidação das argamassas. A água de cal é um meio fortemente alcalino, sendo os pigmentos inorgânicos os que apresentam melhor resistência e durabilidade quando incorporados nesta solução.*

*Os produtos estudados foram aplicados em provetes de revestimento de argamassa de cal aérea; estes provetes foram feitos com uma quantidade reduzida de ligante, para simular um revestimento antigo com perda de coesão superficial. Realizaram-se ensaios de carácter mecânico, físico e cromático, que possibilitaram aferir a eficácia dos produtos consolidantes aplicados. Executou-se também um ensaio de envelhecimento artificial acelerado, para avaliar a variação das características das superfícies tratadas quando expostas a ciclos climáticos. Concluiu-se que os produtos consolidantes testados são compatíveis, eficazes e apresentam boa durabilidade, e ainda que a adição dos pigmentos pode prejudicar ligeiramente o incremento das resistências mecânicas conferido pela consolidação das argamassas.*

*Este trabalho insere-se no projecto LIMECONTECH desenvolvido no LNEC, Universidade de Aveiro e Universidade Nova de Lisboa e financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.*

## 1. INTRODUÇÃO

As argamassas têm sido utilizadas desde a antiguidade no revestimento de paredes. A composição das argamassas antigas pode ser variada, mas a maioria tem como ligante a cal aérea [1, 2]. Aplicadas em várias camadas em sistemas de reboco, as argamassas antigas de cal aérea eram caracterizadas por uma baixa resistência mecânica, elevada deformabilidade, boa aderência ao suporte e boa trabalhabilidade; além disso a elevada porosidade promovia uma boa permeabilidade ao vapor de água, [3].

Os revestimentos de acabamento exterior desempenham uma função protectora das alvenarias contra as acções externas, e definem o seu aspecto estético. Devido à sua exposição, são dos elementos construtivos mais sujeitos à degradação.

A perda de coesão dos revestimentos antigos é uma das anomalias mais frequentemente observada, e que se caracteriza pelo enfraquecimento das ligações entre as várias partículas da argamassa, levando à diminuição da resistência mecânica [4, 5]. A argamassa torna-se um material friável e susceptível à perda de material (desagregação, farinação e pulverização). As causas mais comuns associadas a este tipo de degradação são: a presença prolongada de humidade; a cristalização de sais solúveis no interior dos poros da argamassa; a acção de microorganismos; ou a ocorrência de fenómenos químicos e formação de produtos secundários entre o revestimento e a envolvente [5].

A consolidação é a opção a tomar no tratamento de revestimentos antigos com perda de coesão, quando se pretende a conservação do revestimento original, o que acontece geralmente quando o mesmo apresenta um valor patrimonial elevado [6]. Os materiais a adoptar neste tipo de intervenções devem ser materiais compatíveis química e fisicamente com o revestimento original; a utilização de materiais não adequados pode acelerar o processo de degradação [6, 7].

A restituição da coesão dos revestimentos é conseguida através da aplicação na sua superfície degradada de produtos consolidantes líquidos; estes produtos penetram no interior do revestimento e reconstituem a ligação entre as partículas pelo processo de solidificação [8]. Os produtos consolidantes geralmente utilizados são produtos orgânicos ou produtos inorgânicos.

Os produtos orgânicos, à base de resinas acrílicas, vinílicas ou silicónicas, apresentam, em regra, maior facilidade de aplicação, maior flexibilidade e maior capacidade adesiva, mas são geralmente incompatíveis. Os consolidantes inorgânicos, onde se inserem o hidróxido de cálcio, o hidróxido de bário ou o silicato de etilo, são os produtos mais utilizados, principalmente devido à sua maior compatibilidade e durabilidade [6, 7]. Quando se usam consolidantes de base orgânica, a consolidação das partículas é feita por colagem; no caso do hidróxido de cálcio, hidróxido de bário ou silicato de etilo, a consolidação é conseguida através da regeneração do ligante degradado ou perdido [9].

A escolha dos produtos a utilizar deve ter em consideração alguns parâmetros importantes para que uma consolidação eficaz seja atingida: boa capacidade de penetração; aumento da resistência mecânica; capacidade consolidante; compatibilidade com o substrato; efeito na absorção de água e permeabilidade ao vapor de água; durabilidade; alteração cromática [7, 8, 10, 11].

O produto consolidante não deve modificar a estrutura porosa, nem reduzir excessivamente a capilaridade nem a permeabilidade ao vapor de água; desta forma, evita-se a acumulação de água nas zonas tratadas, que pode dar origem a várias formas de degradação [9].

Neste trabalho utilizaram-se produtos consolidantes à base de hidróxido de cálcio, metacaulino, água e pigmentos inorgânicos. No caso das argamassas de cal aérea, o consolidante à base de hidróxido de cálcio e água (solução aquosa de cal) é claramente o produto mais compatível. A adição de um produto pozolânico, como o metacaulino, tem em vista o incremento da resistência mecânica e da durabilidade dos revestimentos tratados. A adição dos pigmentos tem como objectivo avaliar a viabilidade da reintegração cromática das zonas tratadas, assim como avaliar a influência na consolidação dos revestimentos.

Os pigmentos de origem mineral são os que apresentam melhor resistência e durabilidade quando introduzidos em ambientes fortemente alcalinos, como é o caso das soluções aquosas de cal. Foram utilizados pigmentos que se incluem no grupo dos ocre, com a cor amarela e vermelha, compostos à

base de minerais de ferro (óxidos de ferro); os ocres são pigmentos utilizados desde a antiguidade e dos mais facilmente encontrados em arqueologia [12]. A coloração amarela é conferida principalmente devido à presença da goetite ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ), e no caso da coloração vermelha pela presença da hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) [12, 13]. Portugal é um país geologicamente rico em pigmentos ocres amarelos e vermelhos, mas cuja tradição de extracção destes pigmentos naturais está praticamente abandonada [13, 14].

Os produtos consolidantes foram aplicados em provetes de argamassa de cal aérea e areia (com um teor reduzido de ligante) simulando uma argamassa com perda de coesão.

## 2. MATERIAIS E METODOLOGIA

### 2.1 Preparação dos provetes de argamassa

As argamassas preparadas têm um traço volumétrico ligante:agregado de 1:4, que permite assim obter uma argamassa com fraco teor de ligante e uma baixa coesão superficial. O ligante utilizado foi uma cal aérea comercial nacional; nos agregados foram utilizadas três granulometrias diferentes de areias siliciosas calibradas, com dimensões das partículas inferiores a 2mm.

Prepararam-se provetes prismáticos de argamassa (40x40x160mm) [21], e aplicaram-se camadas únicas de argamassa com cerca de 15mm de espessura em tijolos. Até atingirem os 90 dias de carbonatação, todos os provetes foram mantidos em ambiente controlado com temperatura de  $20\pm 2^\circ\text{C}$  e  $50\pm 5\%$  de humidade relativa (HR).

Após a aplicação dos produtos estudados, os provetes prismáticos destinaram-se à realização de ensaios mecânicos; as camadas de argamassa aplicadas em tijolos tiveram como objectivo a realização de ensaios de carácter físico (dureza superficial e absorção de água) e a realização de um ensaio de envelhecimento artificial.

### 2.2 Produtos consolidantes

- **Materiais utilizados:**

Os produtos consolidantes estudados foram obtidos de uma mistura de cal, metacaulino (MK), água, e em alguns casos com a adição de pigmentos inorgânicos.

O MK ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ ) é um material pozolânico artificial obtido por tratamento térmico (calcinação) do caulino ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ), entre os  $600^\circ\text{C}$  e os  $800^\circ\text{C}$  [16]; a calcinação do caulino provoca o colapso total ou parcial da sua estrutura cristalina e dá-se a formação de uma fase amorfa e reactiva, constituída maioritariamente por sílica e alumina, que conferem a reactividade pozolânica ao MK [7]. Após o tratamento térmico, o MK obtido é moído para obtenção de uma superfície específica elevada e, por consequência, um aumento do grau de pozolanicidade.

À temperatura ambiente e na presença de água, os constituintes amorfos do MK combinam-se com o hidróxido de cálcio dando origem a compostos hidráulicos com propriedades aglomerantes [15].

A introdução de MK em argamassas e betões tem como vantagens o aumento das resistências mecânicas, a redução da permeabilidade, o aumento da resistência a ataques químicos, a redução dos efeitos da reactividade álcali-sílica, o aumento da compacidade do betão, e o aumento da trabalhabilidade, o que se traduz numa maior durabilidade [17].

Utilizou-se um metacaulino comercial (Argical M-1200S, Imerys) com as seguintes características: percentagens de sílica ( $\text{SiO}_2$ ) de 55% e de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) de 39%; índice de pozolanicidade de  $1400\text{mg Ca}(\text{OH})_2/\text{g}$ ; distribuição granulométrica inferior a  $2\mu\text{m}$  em cerca de 55% do material; massa volúmica de  $400\text{ kg/m}^3$ .

Em relação aos pigmentos inorgânicos, utilizou-se um ocre amarelo (Ocre Alvalade) de origem natural, e um ocre vermelho (Vermelho Bayer) de origem sintética. O Ocre Alvalade (OA) é um pigmento mineral natural composto apenas por goetite ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ); o Vermelho Bayer (VB) é um pigmento mineral sintético que tem a hematite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) como único constituinte. Os ocres de origem

natural possuem elevada capacidade de coloração, mas podem ser pouco homogêneos, dependendo da zona de extracção. Os ocre de origem sintética possuem um elevado grau de pureza, uma maior estabilidade química e térmica, e uma maior uniformidade de cor [18].

- **Composição dos produtos:**

A percentagem de MK adoptada de 25% representa a percentagem da cal que é substituída pelo produto pozolânico; a adopção desta percentagem vem no seguimento de experimentações posteriores (17%) [7] e o seu aumento pretende potenciar uma maior formação de compostos pozolânicos, importantes no incremento das resistências mecânicas. As adições de pigmentos inorgânicos, nas concentrações de 3% e 5%, são obtidas em função da massa da cal e do MK. Nas caiações pigmentadas, a concentração de pigmento faz-se em relação ao peso da cal, e com valores que normalmente não excedem 5% [19].

A razão sólido:líquido utilizada foi de 1:4, e foi obtida depois de experimentações prévias com diferentes razões sólido:líquido (de 1:1 até 1:6); o produto consolidante quer-se diluído e com um resíduo seco aceitável, de maneira a permitir uma adequada profundidade de penetração [7]. A razão sólido:líquido foi optimizada tendo em conta resíduos secos, alterações cromáticas e reactividade pozolânica, que pode diminuir com o seu aumento.

A terminologia adoptada para os produtos estudados foi:

- *MK25%* - Cal + MK25% + H<sub>2</sub>O;
- *MK25%+OA3% ou OA5%* - Cal + MK 25% + Ocre Alvalade 3% ou 5% + H<sub>2</sub>O;
- *MK25%+VB3% ou VB5%* - Cal + MK 25% + Vermelho Bayer 3% ou 5% + H<sub>2</sub>O.

- **Preparação e aplicação dos produtos:**

A preparação dos produtos consolidantes compreende o seguinte procedimento: pesagem e mistura manual dos componentes secos; adição da água destilada; colocação em agitação magnética para homogeneização. A aplicação dos produtos foi feita por nebulização (Fig. 1a) e 1b)), de modo a obter uma distribuição mais homogênea. Realizaram-se dez aplicações consecutivas por provete de argamassa; no caso dos provetes prismáticos os consolidantes são aplicados numa das faces, e no caso das camadas de argamassa aplicadas em tijolos, os consolidantes são aplicados na sua superfície.

Após aplicação dos produtos consolidantes, os vários provetes foram sujeitos a 7 dias de cura com 95%HR, nomeadamente em sacos de plástico, de modo a tentar favorecer a formação dos compostos pozolânicos; no restante período de cura, os provetes tratados foram mantidos em ambiente controlado com temperatura ambiente média de 20°C e 65% de HR.

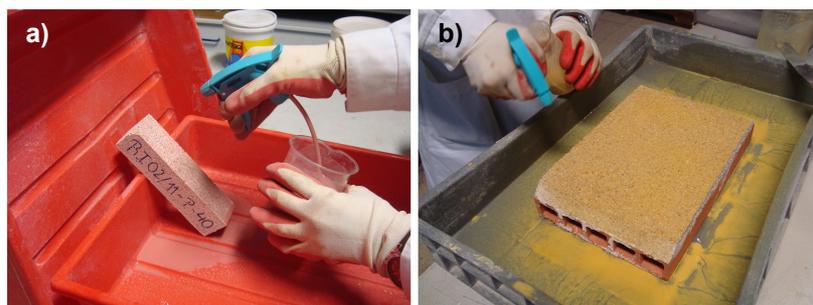


Fig. 1 - Aplicação dos produtos consolidantes por nebulização nos a) provetes prismáticos de argamassa e nos b) provetes de argamassa aplicada nos tijolos

## 2.3 Ensaio realizados

A caracterização dos tratamentos consolidantes foi feita através de uma metodologia de análise que inclui vários ensaios, realizados aos 90 dias após a aplicação dos produtos nos provetes de argamassa.

A nível mecânico, foram realizados ensaios para determinação do módulo de elasticidade dinâmico ( $E_d$ ), da resistência à tracção por flexão ( $R_t$ ) e da resistência à compressão ( $R_c$ ). O  $E_d$  foi determinado com recurso a um aparelho de medição da frequência de ressonância longitudinal; o ensaio foi realizado de acordo com a norma NF B10-511 [20]. A  $R_t$  e a  $R_c$  (Fig. 2a)) foram determinadas utilizando uma máquina de ensaios mecânicos Hoytom HM-S, e com base na norma EN 1015-11:1999 [21].

A profundidade de penetração das soluções consolidantes foi observada com recurso a um estereomicroscópio Olympus SZH10.

As alterações de absorção de água após o tratamento consolidante foram verificadas através do ensaio de absorção de água sob baixa pressão, utilizando os tubos de Karsten (Fig. 2b)) [22].

Os incrementos de dureza superficial das argamassas foram avaliados com um durómetro Shore A, de acordo com a norma ASTM D2240 (Fig. 2c)) [23].

A durabilidade dos consolidantes é um factor importante na escolha dos produtos a utilizar; este parâmetro foi avaliado com um ensaio de envelhecimento artificial acelerado, onde os provetes foram sujeitos a ciclos de calor-frio e de chuva-frio (Fig. 2d)) [24]. Por fim, as possíveis alterações cromáticas foram avaliadas utilizando a escala cromática NCS (Fig. 2e)).

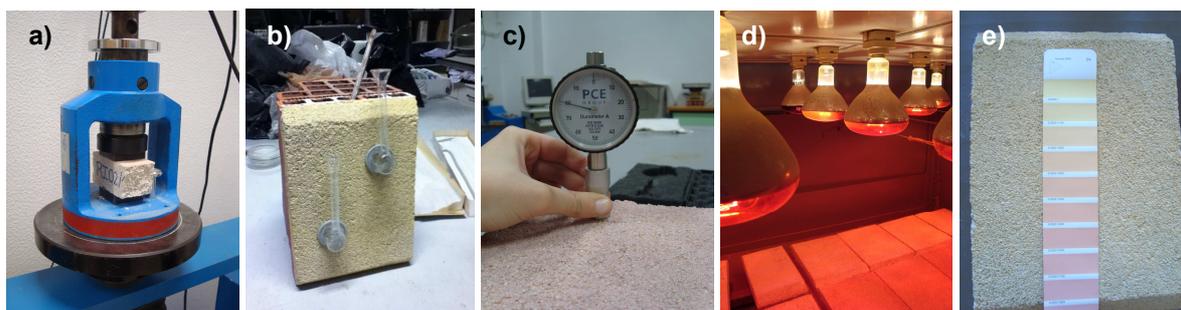


Fig. 2 - Caracterização dos tratamentos consolidantes: a) Resistência à compressão; b) Tubos de Karsten; c) Durómetro; d) Envelhecimento artificial; e) Medição dos índices de cor NCS

## 3. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 3.1 Ensaio mecânicos: módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão e à compressão

A realização dos ensaios mecânicos teve como objectivo avaliar os incrementos das resistências mecânicas, devido à aplicação dos consolidantes. A Tabela 1 reúne os resultados médios obtidos e respectivos desvios padrão e os incrementos percentuais ( $\Delta$ ) das resistências em relação ao caso não tratado; para determinação de  $E_d$  foram realizadas 6 séries de medidas por cada tratamento; para a  $R_t$  e  $R_c$  foram realizadas respectivamente 3 e 6 medidas por cada tratamento.

De um modo geral as características mecânicas sofreram um incremento com a aplicação dos consolidantes.

Em relação ao  $E_d$ , o consolidante MK25%+VB, em ambas as concentrações, confere o maior incremento. O consolidante MK25%+OA apresenta um resultado ligeiramente abaixo da argamassa não tratada na concentração de 3%.

Os tratamentos consolidantes não conferiram uma melhoria da  $R_t$ . Os consolidantes MK25%+VB3% e MK25%+VB5% apresentaram resultados médios abaixo do não tratado, mas com desvios padrão

elevados. O consolidante que apresentou melhor  $R_t$  foi o consolidante com pigmento OA, atingindo resultados superiores à argamassa não tratada e ao produto MK25%.

A  $R_c$  é superior à referência na totalidade dos tratamentos aplicados. O consolidante com pigmento OA confere o maior incremento de  $R_c$  da argamassa.

De facto, as resistências mecânicas não devem ser alteradas em demasia, de modo a não introduzir tensões no revestimento. O aumento conseguido com os tratamentos consolidantes deve ser moderado e não ultrapassar os 50% [8]; identifica-se apenas um caso -  $E_d=1320\text{MPa}$  com MK25%+VB3% -, que se traduz num aumento de 78%. Em todos os outros casos considera-se que foram obtidos incrementos moderados e adequados, com excepção da  $R_t$ , em que não se verificou aumento.

Tabela 1 - Resultados do módulo de elasticidade dinâmico, resistência à tracção por flexão e resistência à compressão (valores médios e desvios padrão)

Consolidante	Mód. Elast. Dinâmico		Resist. à tracção por flexão		Resist. à compressão	
	Ed [MPa]	$\Delta$ [%]	$R_t$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta$ [%]	$R_c$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\Delta$ [%]
Não tratado	740±152	-	0,53±0,03	-	0,62±0,09	-
MK25%	912±31	23%	0,50±0,05	-6%	0,80±0,17	+29%
MK25%+OA3%	698±83	-6%	0,60±0,10	+13%	0,95±0,05	+53%
MK25%+OA5%	809±191	+9%	0,53±0,06	0%	0,87±0,11	+40%
MK25%+VB3%	1320±138	+78%	0,45±0,10	-15%	0,73±0,08	+18%
MK25%+VB5%	964±120	+30%	0,48±0,08	-9%	0,80±0,05	+29%

### 3.2 Profundidade de penetração

A profundidade de penetração dos consolidantes pigmentados foi medida com um microscópio óptico Olympus SZH10 e usando o software LabSens. A profundidade de penetração é um dos requisitos mais importantes dos produtos consolidantes, e essencial para o sucesso do tratamento. O consolidante deve atingir a profundidade suficiente para consolidar a espessura degradada do material [11]. Foi medido um número mínimo de 12 pontos por amostra, e os valores são reportados na Tabela 2. Na Fig. 4a) e 4b) estão exemplos de alguns pontos medidos.

Tabela 2 - Valores médios, mínimos e máximos da profundidade de penetração

Consolidante	Valor médio [mm]	Valor máximo [mm]	Valor mínimo [mm]
<b>MK25% + OA5%</b>	2,1±1,0	5,1	1,2
<b>MK25% + VB5%</b>	3,1±1,1	6,5	1,7

Verificou-se que o consolidante MK25%+VB5% atinge em média uma maior profundidade de penetração que o consolidante MK25%+OA5%, com uma diferença de 1mm.

A profundidade de penetração atingida pelos produtos consolidantes pode ser influenciada por vários factores: composição e viscosidade do produto consolidante; técnica de aplicação do produto; grau de degradação e composição do material a ser tratado [19].

Com um resíduo seco inferior, os produtos consolidantes MK25%, MK25%+OA3% e MK25%+VB3%, podem atingir uma profundidade de penetração ligeiramente superior; especialmente o consolidante MK25% sem incorporação de pigmento.

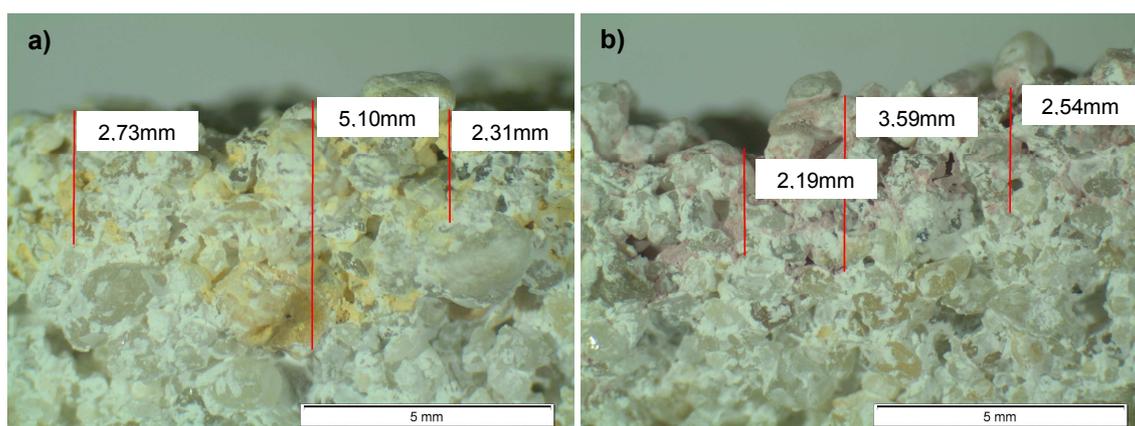


Fig. 3 - Exemplos de pontos medidos da profundidade de penetração: a) MK25%+OA5%; b) MK25%+VB5%

### 3.3 Absorção de água sob baixa pressão (tubos de Karsten)

O ensaio de absorção de água sob baixa pressão tem como objectivo verificar a alteração da permeabilidade à água nas argamassas tratadas, por comparação com a argamassa não tratada. Para realização do ensaio são utilizados tubos de Karsten que simulam uma pressão dinâmica de vento equivalente a cerca de 140km/h [7]. As argamassas ensaiadas foram as argamassas aplicadas sobre tijolos; colocaram-se 2 tubos de Karsten por provete, fixados com mastique. Mediu-se o tempo necessário para a absorção da totalidade de água (4ml) introduzida nos tubos de Karsten. Foram ensaiados 3 provetes de cada consolidante estudado.

É importante que os tratamentos consolidantes não tornem a argamassa demasiado impermeável, mas reduzam a sua permeabilidade dentro de intervalos razoáveis.

Na Fig. 5 apresentam-se os resultados obtidos. Todos os produtos aplicados provocaram uma diminuição na absorção de água das argamassas, atingindo um valor médio de 7 vezes o tempo de absorção de água da argamassa não tratada. Mesmo assim, considera-se toda a gama de valores obtida adequada, com uma redução razoável da permeabilidade da argamassa. Comparando os produtos pigmentados com o produto não pigmentado, observa-se que ambos os consolidantes pigmentados a 3% atingem um tempo de absorção superior, o que já não acontece com a concentração de 5%.

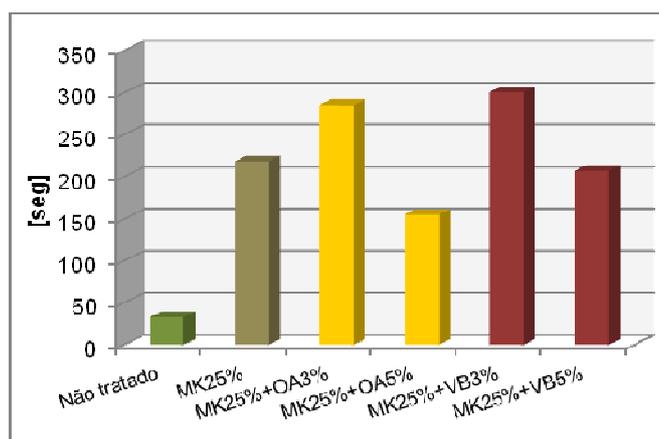


Fig. 4 – Tempo de absorção de água sob baixa pressão das argamassas ensaiadas

### 3.4 Dureza superficial (durómetro Shore A)

A dureza superficial das argamassas pode ser avaliada com um durómetro; este equipamento mede a resistência à penetração de um pino pressionado contra o material em estudo. Possui escalas Shore A a D consoante o tipo de material (macio a duro), e cujos valores de resistência à penetração variam entre 0 e 100. Neste caso utilizou-se o durómetro Shore A, apropriado para materiais macios, e regularmente utilizado em ensaios em argamassas.

Com este ensaio, pretende-se avaliar o incremento de dureza superficial das argamassas conseguido com a aplicação das várias soluções de consolidação em estudo, por comparação com a referência não tratada. Foram feitas medições em 12 pontos de cada camada de argamassa aplicada sobre tijolos, analisando 3 provetes por cada tratamento. Na Fig. 6 apresentam-se os resultados obtidos e os respectivos incrementos de dureza superficial obtidos com as aplicações de cada produto consolidante.

Nota-se um aumento da dureza superficial das argamassas no caso de todos os tratamentos consolidantes, com um incremento médio de 10%. Comparando com o consolidante MK25%, os resultados médios obtidos são todos bastante próximos e apenas o consolidante pigmentado MK25%+VB5% conseguiu atingir uma maior dureza superficial.

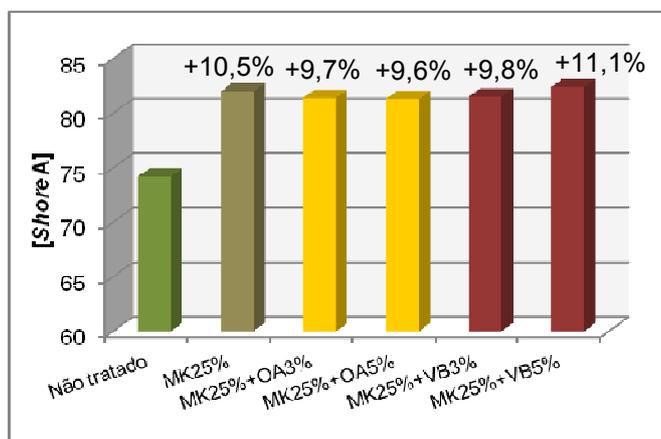


Fig. 5 - Dureza superficial das argamassas ensaiadas

### 3.5 Envelhecimento artificial acelerado

As argamassas aplicadas em tijolos foram sujeitas a ciclos de calor-frio e ciclos de chuva-frio, com o objectivo de avaliar a durabilidade dos tratamentos aplicados, e a variação cromática dos produtos consolidantes quando sujeitos a condições térmicas e hígricas extremas. Os ciclos foram realizados com as seguintes condições:

- **8 Ciclos calor-frio:**
  - Calor a 60°C, simulado com lâmpadas de radiação infra-vermelha (IV), durante 8h;
  - Frio a -15°C, simulado numa arca frigorífica, durante 15h;
  - Estabilização em ambiente controlado com 20°C e 65%HR, durante 1h;
- **8 Ciclos chuva-frio:**
  - Chuva simulada por sistema de aspersão, à temperatura ambiente e durante 8h;
  - Frio a -8°C, simulada numa arca frigorífica, durante 15h;
  - Estabilização em ambiente controlado com 20°C e 65%HR durante 1h.

Todas as argamassas resistiram bem aos ciclos de calor-frio. Os ciclos de chuva-frio foram os que provocaram uma maior degradação, especialmente na argamassa sem qualquer tratamento. Estes ciclos eram espectavelmente agressivos para as argamassas de cal, uma vez que a congelação da água no interior dos poros provoca um aumento do volume e dá origem a tensões no interior da argamassa.

No final dos ciclos de chuva-frio, as argamassa tratadas apresentaram alguma fissuração nas zonas de extremidade e uma reduzida perda de material nessas mesmas áreas. Já a argamassa não tratada apresentou um nível de degradação bastante severo, com uma área de argamassa resistente apenas de 25% da área inicial; a degradação começou com uma ligeira fissuração nas zonas extremas da argamassa, tendo-se posteriormente agravado a perda de coesão e iniciado a desagregação de várias partes da camada de argamassa, que foram escoadas pela chuva simulada. As figuras seguintes ilustram o estado das argamassas no final do ensaio de envelhecimento (Fig.6 e Fig.7).

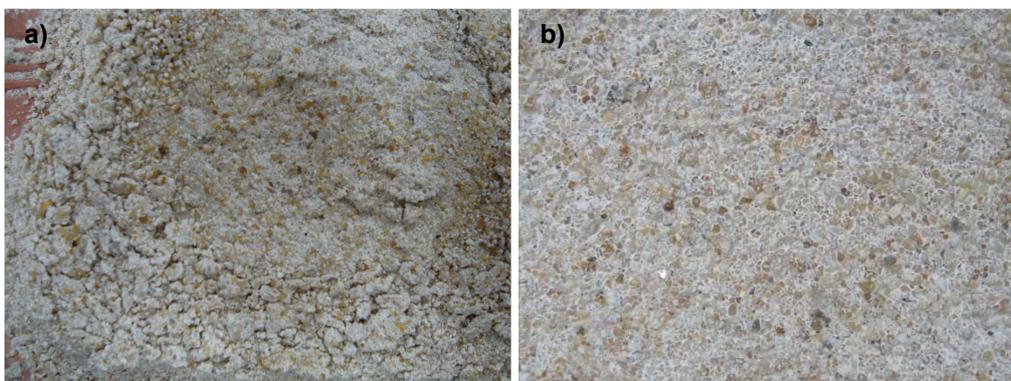


Fig. 6 - Argamassas no final do ensaio de envelhecimento: a) Argamassa não tratada; b) Argamassa com MK25%

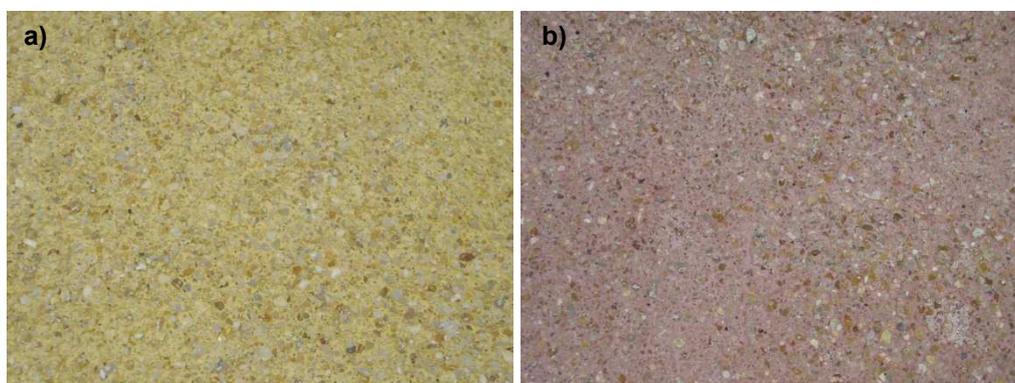


Fig. 7 - Argamassas no final do ensaio de envelhecimento: a) Argamassa com MK25%+OA5%; b) Argamassa com MK25%+VB5%

Em relação às variações cromáticas, apresenta-se na Tabela 3 a evolução dos índices da escala NCS, identificados antes, durante e no final do ensaio de envelhecimento artificial acelerado.

Comparando com os índices de cor identificados antes do início do ensaio, os consolidantes pigmentados com uma concentração de pigmento de 5% apresentaram a maior variação cromática. O consolidante MK25%, sem adição de pigmentos, não apresentou qualquer alteração a nível

cromático ao longo de todo o ensaio.

Os consolidantes com pigmento VB, tiveram alteração cromática apenas durante os ciclos de calor-frio; já os consolidantes com pigmento OA, tiveram alterações cromáticas ao longo de todo o ensaio de envelhecimento. O pigmento VB é um pigmento inorgânico sintético pelo que, comparativamente com os pigmentos inorgânicos naturais, apresenta uma maior estabilidade a nível cromático quando sujeito a gradientes térmicos.

Na exposição aos ciclos de chuva-frio, não houve qualquer “lavagem” dos pigmentos, o que é indicativo de que se encontram bem fixados nos produtos consolidantes.

Tabela 3 - Evolução cromática ao longo do ensaio de envelhecimento artificial acelerado (valores NCS)

Consolidante	Antes	Após ciclos de calor-frio	Após ciclos de chuva-frio
<b>Não tratado</b>	S 0502-Y	S 0502-Y	S 0502-Y
<b>MK25%</b>	S 0500-N	S 0500-N	S 0500-N
<b>MK25% + OA3%</b>	S 0520-Y10R    S 0530-Y	S 0530-Y10R    S 0540-Y20R	S 0530-Y10R
<b>MK25% + OA5%</b>	S 0520-Y10R    S 0530-Y10R	S 0530-Y10R    S 0540-Y20R	S 0520-Y10R    S 0540-Y20R
<b>MK25% + VB3%</b>	S 1020-R	S 0520-R10B    S 0520-R20B	S 0520-R10B    S 0520-R20B
<b>MK25% + VB5%</b>	S 1030-R    S 1030-R10B	S 0530-R10B    S 0530-R20B	S 0530-R10B    S 0530-R20B

#### 4. CONCLUSÕES

A realização deste estudo permitiu caracterizar o efeito da adição de pigmentos em produtos consolidantes pozolânicos, aplicados em argamassas de cal aérea com perda de coesão, e a viabilidade da reintegração cromática. Os produtos consolidantes estudados são constituídos à base de cal, metacaulino, água e pigmentos.

Os vários ensaios realizados permitiram aferir acerca do incremento das resistências mecânicas, da profundidade de penetração, do incremento da dureza superficial, da alteração da permeabilidade à água, e da durabilidade e variação cromática das argamassas tratadas. Com base na campanha experimental, foi possível verificar que:

- ✓ A adição dos pigmentos pode influenciar as resistências mecânicas, com alguns resultados abaixo dos resultados do consolidante sem incorporação de pigmentos mas outros superiores; no caso da absorção de água verifica-se uma redução da permeabilidade dentro de uma gama de valores adequados, com ou sem pigmentos; na dureza superficial observa-

- se um aumento após consolidação, existindo pequenas diferenças, dos resultados dos produtos pigmentados em relação ao consolidante sem incorporação de pigmentos;
- ✓ Em termos cromáticos, todos os tratamentos resistiram bem às variações higro-térmicas a que foram expostos; a menor variação cromática foi observada nos produtos consolidantes pigmentados com VB;
  - ✓ Os tratamentos consolidantes, com e sem pigmentos, mostraram melhorar a resistência à degradação mecânica por variações termo-higrométricas, reduzindo a tendência para a fissuração e para a desagregação;
  - ✓ Em relação ao pigmento natural (OA), o pigmento sintético (VB) apresentou uma maior estabilidade cromática, consistente com módulo de elasticidade e dureza superficial superiores, e uma redução da permeabilidade também superior; no entanto, a nível das resistências à tracção por flexão e à compressão foi o que levou aos menores incrementos, ao contrário dos casos com pigmento natural;

É certo que a eficácia dos tratamentos de consolidação pode ser ligeiramente afectada devido à incorporação de pigmentos. No entanto, as variações não foram consistentemente negativas, observando-se também efeitos positivos nalgumas características. O facto de se conseguir reintegrar cromaticamente as partes do revestimento intervencionadas ao mesmo tempo que se aplica o tratamento de consolidação, representa uma notável vantagem que pode compensar a eventual ligeira perda de eficácia na consolidação.

Todos os produtos consolidantes aplicados contribuíram para restituir a coesão entre as partículas das argamassas. As alterações introduzidas nas características mecânicas e físicas das argamassas tratadas foram alterações moderadas e adequadas, comprovando a compatibilidade físico-química dos produtos consolidantes estudados.

## REFERÊNCIAS

- [1] R. Veiga, J. Aguiar, A. Santos Silva e F. Carvalho, “Conservação e renovação de revestimentos de paredes de edifícios antigos”, Lisboa: LNEC, 2004, Vol. 9 Colecção Edifícios.
- [2] J. Eisen, “Microscopy of historic mortars – a review”, Cement and Concrete Research, Vol. 36, pp.1416-1424, (2006).
- [3] F. Pinho, “Paredes de edifícios antigos em Portugal”, Lisboa: LNEC, 2008 (2ª edição), Vol. 8 Colecção Edifícios.
- [4] M. Tavares, R. Veiga e A. Fragata, “Conservation of old renderings – the consolidation of rendering with loss of cohesion”, In 1<sup>st</sup> Historical Mortars Conference, HMC08, Lisbon, 2008.
- [5] A. C. Magalhães, “Patologia de rebocos antigos”, Lisboa: LNEC, 2002, Cadernos de Edifícios n.º2.
- [6] R. Veiga, “Conservação e reparação de revestimentos de paredes de edifícios antigos. Métodos e materiais”, Lisboa: LNEC, 2011 (2ª edição).
- [7] G. Borsoi, R. Veiga e A. Santos Silva, “Consolidação de argamassas históricas de revestimentos com produtos compatíveis: avaliação da eficácia”, In 4º Congresso Português de Argamassas e Etics, APFAC, Coimbra, 2012.
- [8] L. Toniolo, A. Paradisi, S. Goidanich e G. Pennati, “Mechanical behavior of lime based mortars after surface consolidation”, Construction and Building Materials, Vol. 25, pp. 1553-1559, (2011).
- [9] R. Veiga, “Conservação de revestimentos de alvenarias históricas. Tratamento e consolidação *versus* renovação”, 4º Congresso de Patologia e Reabilitação de Edifícios, PATORREB, Santiago de Compostela, 2012.
- [10] E. Hansen, E. Doehne, J. Fidler, J. Larson, B. Martin, M. Matteini, C. Rodriguez-Navarro, E. S. Pardo, C. Price, A. De Tagle, J. M. Teutonico e N. Weiss, “A review of selected inorganic consolidants and protective treatments for porous calcareous materials”, Reviews in

- Conservation, Vol. 4, pp.13-25, (2003).
- [11]M. G. Casal, “Conservação de pintura mural – estudo e consolidação de argamassas de cal aérea e areia com falta de coesão”, Lisboa: LNEC, 2001.
- [12]D. Hradil, T. Grygar, J. Hradilová e P. Bezdicka, “Clay and iron oxide pigments in the history of painting”, Applied Clay Science, Vol. 22, pp. 223-236, (2003).
- [13]M. Gil, M. L. Carvalho, A. Seruya, A. Candeias, A. E. Mirão e I. Queralt, “Yellow and red ochre pigments from southern Portugal: elemental composition and characterization by WDXRF and XRD”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, Vol. 580, pp. 728-731, (2007).
- [14]P. Faria, M. Tavares, M. Menezes, R. Veiga e G. Margalha, “Traditional Portuguese techniques for maintenance of historic renders”, In 2<sup>nd</sup> Historical Mortars Conference, HMC10, Prague, 2010.
- [15]A. de Sousa Coutinho, “Fabrico e propriedades do betão”, Lisboa: LNEC, 2006 (4<sup>a</sup>edição), Volume I.
- [16]A. Velosa, “Argamassas de cal com pozolanas para revestimento de paredes antigas”, Tese para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Civil, Aveiro: UA, 2006.
- [17]R. Siddique e J. Klaus, “Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: a review”, Applied Clay Science, Vol. 43, pp. 392-400, (2009).
- [18]L. Rocha-Gomes e C. Alvarez, “Análise crítica dos aspectos ambientais no uso de pigmentos nas argamassas de rejuntamento do Espírito Santo (Brasil): diagnóstico e recomendações”, In 2<sup>o</sup> Congresso Português de Argamassas de Construção, APFAC, FIL, Lisboa, 2007.
- [19]M. Tavares, “A conservação e o restauro de revestimentos exteriores de edifícios antigos. Uma metodologia de estudo e reparação”, Tese de doutoramento apresentada à Universidade Técnica de Lisboa em 2009. Lisboa: LNEC, 2011.
- [20]NF B10-511, “Mésure du module d’élasticité dynamique”, France: AFNOR, 1975.
- [21]EN 1015-11:1999, “Methods of test for mortar for masonry, Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar”, Brussels: CEN, 1999.
- [22]FE Pa 39, “Ensaio de absorção de água sob baixa pressão”, Lisboa: LNEC/NCC, 2002.
- [23]ASTM D2240-00, “Standard test method for rubber property – durometer hardness”, United States: ASTM Standards, 2000.
- [24]EN 1015-21:2002, “Methods of test for mortar for masonry, Part 21: Determination of the compatibility of one-coat rendering mortars with substrate”, Brussels: CEN, 2002.