



AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DE CALDAS DE INJEÇÃO EM ENSAIOS DE ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL

Eduarda Luso¹, Paulo B. Lourenço²

¹ISISE, Instituto Politécnico de Bragança, eduarda@ipb.pt, ²ISISE, Universidade do Minho, pbl@civil.uminho.pt

RESUMO

A injeção de caldas à base de cimento ou à base de cal, é uma prática comum no âmbito da Engenharia Civil, nomeadamente em solos, no tratamento de fundações rochosas de barragens, em betão estrutural, no tratamento de fissuras e inclusive em alvenaria de pedra, de forma a melhorar as respetivas propriedades mecânicas e/ou hidráulicas, deste tipo de obras. O ICOMOS recomenda a injeção de argamassas fluidas (caldas) como uma das possíveis técnicas de intervenção a considerar para reforço e consolidação de alvenarias antigas. A escolha da calda a injetar é baseada na experiência da aplicação do produto em outros casos semelhantes, na facilidade de aquisição e transporte ou, ainda, na maioria das vezes, em fatores económicos. Por isso, as caldas comerciais são muito usadas na prática embora as respetivas fichas técnicas tenham informação dispersa e muito vaga e têm sido aplicadas sem conhecimento total das suas propriedades.

Neste trabalho, em particular, foi avaliada a durabilidade de uma calda de injeção comercial através do decréscimo da tensão de aderência ao longo de vários ciclos de envelhecimento acelerado em ensaios de curta duração. Ao fim de 252 ciclos de envelhecimento artificial em câmara climática com variação das condições ambientais (calor e frio), não foi obtida praticamente alteração na capacidade aderente da calda em estudo, no entanto parece haver um melhor comportamento face a ciclos de calor e pior devido à ação de temperaturas negativas, bem como uma alteração no modo de rotura dos provetes.

Palavras-chave: Degradação / Injeção / Calda comercial / Durabilidade



1. INTRODUÇÃO

As paredes de alvenaria de pedra estão presentes em muitos edifícios e monumentos históricos, com valor patrimonial inegável, mas também em edifícios antigos de habitação, tanto em Portugal como na Europa. Grande parte destas edificações em alvenaria encontra-se, em certos casos, num elevado estado de degradação pelo que necessitam de intervenção urgente (Luso e Lourenço, 2014).

A injeção de caldas (ou argamassas fluidas) à base de cal no seio da alvenaria constitui uma técnica passiva que restitui a integridade ao edifício e melhora a sua capacidade resistente, ver Fig. 1. A escolha do tipo de calda a utilizar constitui um dos problemas desta técnica, pelo que têm sido amplamente utilizados os produtos pré-doseados disponíveis comercialmente para este fim. No entanto, estes materiais apresentam na respetiva ficha técnica informação diferenciada e muito limitada. Uma das lacunas é precisamente a durabilidade destas caldas, tema sobre o qual parece não existir qualquer investigação prévia. A durabilidade ou fim da vida útil, aparentemente de leitura unívoca por representar o termo do usufruto ou o fim da aplicação de determinado material, pode ter diferentes interpretações. No caso específico das caldas de injeção a durabilidade poderá ser quantificada em termos de resistência mecânica ou resistência química já que, por exemplo, a aparência ou alterações físicas, como a textura, não parecem ser um critério determinante na avaliação da durabilidade.



Fig. 1 – Exemplos de injeções em paredes de alvenaria de pedra ou tijolo

2. AS CALDAS DE INJEÇÃO: MATERIAIS E PROPRIEDADES

Em trabalhos de conservação de edifícios antigos existe alguma dificuldade na formulação de materiais compatíveis para aplicação, quer em argamassas de reboco e de ligação, quer em caldas de injeção, devido aos requisitos de baixo módulo de elasticidade e resistências



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

mecânicas suficientes e adequadas, bem como um comportamento compatível, quer física, quer quimicamente com os materiais existentes.

No caso específico das caldas de injeção, os requisitos são ainda mais exigentes. Como ponto comum, podemos dizer que as caldas a aplicar em paredes de alvenaria de edifícios antigos devem: (i) assegurar uma boa aderência aos materiais da alvenaria, nomeadamente à pedra; (ii) possuir retração baixa ou nula, para manter o volume sem desenvolvimento de tensões, para evitar a perda de aderência e para reduzir a penetração de humidade através da fissuração causada pela retração; (iii) ter baixa segregação e exsudação para manter o volume e consistência; (iv) possuir elevada fluidez e injetabilidade para fornecer um adequado escoamento e preenchimento de pequenas aberturas e vazios interligados, mesmo usando pressões baixas; (v) resistir a sais solúveis, eventualmente existentes nas paredes e limitar o teor de sais a transmitir às mesmas (Luso, 2012). Baseado no desempenho necessário da estrutura, a formulação da calda deve promover o melhoramento das propriedades mecânicas do sistema injetado sem provocar uma degradação precoce.

O uso de caldas à base de cal-pozzolana-cimento parece ser uma das opções mais atrativas (Toumbakari, 2001), apresentando, potencialmente, muito boas propriedades. Uma outra opção centra-se na utilização de caldas pré-doseadas, disponíveis no mercado e que têm vindo a ser usadas com bastante frequência, pela facilidade de elaboração, por empresas especializadas na área.

3. DURABILIDADE DAS CALDAS DE INJEÇÃO

A questão da durabilidade dos edifícios é um problema relativamente recente, quer se trate de construções novas quer se trate de construções antigas. Este problema torna-se uma questão de extrema importância quando se lida, particularmente, com a aplicação de materiais para reabilitação e reforço de estruturas pertencendo ao património cultural edificado. É sabido que no campo dos monumentos e edifícios antigos, são muitas vezes usados materiais como, por exemplo, o cimento, os polímeros ou combinações dos dois, ocasionalmente incompatíveis com os materiais existentes, trazendo problemas subsequentes, a maioria das vezes, difíceis de resolver.

Sendo a durabilidade definida como a capacidade dos edifícios e seus componentes se manterem com as mesmas características durante a sua vida útil, sem custos imprevistos para manutenção ou reparação, o problema da durabilidade está, portanto, no cerne de qualquer estratégia para o desenvolvimento de materiais destinados a intervenções no património cultural. A durabilidade é assim um requisito fundamental exigido às caldas de injeção,



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

principalmente por não serem materiais facilmente substituíveis ou submetidos periodicamente a trabalhos de conservação. Devem, por isso, apresentar uma boa estabilidade físico-química ou, pelo menos, previsivelmente satisfatória, tendo em conta as inter-reações que se podem desenvolver, a curto e a longo prazo, entre os diversos materiais. Mais concretamente devem conferir resistência aos agentes climáticos, ao desgaste e à erosão pela água, aos agentes químicos, aos efeitos da poluição atmosférica, aos movimentos repetidos dos componentes e, fundamentalmente, boa aderência ao suporte mesmo em condições ambientais severas, conferindo assim um vínculo permanente e completo entre as unidades de alvenaria ou entre as partes a consolidar.

De entre todos estes fatores destaca-se o efeito da exposição a condições climáticas severas que produzem degradação especialmente por ações gelo-degelo e a existência de sais solúveis que desempenham igualmente um papel importante na deterioração das alvenarias antigas.

Mas a durabilidade das caldas de injeção não depende apenas de agentes externos, como alterações de temperatura e humidade, ou da presença de sais solúveis, mas depende também das características e proporções dos materiais constituintes da calda, das propriedades da calda fresca e endurecida e ainda das características da base (pedras, argamassas, e outros materiais) e da própria interação entre todos os componentes. Em cada um desses itens há um grande número de variáveis que poderão alterar significativamente o desempenho da calda.

Por conseguinte, é muito útil, para todos os envolvidos na preservação do património cultural, avaliar a degradação das caldas de injeção face a ambientes agressivos por meio de ensaios acelerados realizados em laboratório, quer de resistência aos sais, quer ensaios de envelhecimento artificial por ciclos climáticos.

Em particular, o estudo do envelhecimento de vários tipos de argamassas (à base de cal ou de cimento) tem sido extensivamente estudado (Silva, 2004; Izaguirre *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2007; Velosa e Veiga, 2007; Lanas *et al.*, 2006), através de ensaios específicos com ciclos de temperatura e humidade que aceleram artificialmente o processo de envelhecimento do material. No entanto, para especificamente caldas de injeção são inexistentes, havendo alguns resultados relativos a ensaios de resistência aos sulfatos protagonizados por Kalagri *et al.* (2010) e Shannag (2002). Este tema tem múltiplos interesses para todos os intervenientes e interessados na preservação do património histórico e cultural e não deve ser descurado.



4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

O trabalho experimental aqui descrito teve como objetivo principal a avaliação da degradação do produto Mape-Antique I (*Ma*) uma calda de injeção comercializada pela empresa *Mapei*.

Não sendo possível testar todas as variáveis relevantes para a durabilidade das caldas de injeção, o estudo laboratorial aqui apresentado compreende apenas uma parte do estudo. Pretendeu-se avaliar a capacidade aderente das caldas de injeção face a variações das condições ambientais, ou seja, sujeitas a ensaios de envelhecimento artificial acelerado por ciclos climáticos.

4.1. Envelhecimento artificial acelerado

Os ensaios de envelhecimento desenvolvidos neste trabalho tiveram como principal objetivo a observação do decréscimo do desempenho das caldas relativamente à aderência. Optou-se, neste caso, por quantificar a tensão de aderência calda/pedra em ensaios de arrancamento. Para obtenção de resultados nesta matéria, foi necessário a execução de um sistema constituído pela calda e pela pedra conforme a Fig. 2. O ensaio de arrancamento consistiu na determinação da força de tração máxima que é necessário aplicar numa área circular, com cerca de 48cm de diâmetro de calda aplicada sobre o suporte pétreo (Luso, 2012).

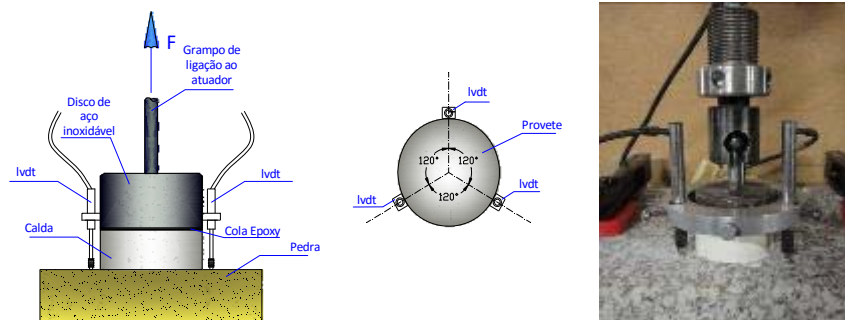


Fig. 2 - Ensaio para determinação da aderência calda/pedra: (a) Desenho esquemático; (b) Pormenor colocação lvdt's; (c) Ensaio em pedra de granito amarelo

Existem algumas normas que regulam os procedimentos de ensaio de envelhecimento artificial acelerado. Das normas e recomendações internacionais revistas (Rilem TC 127, 1998; ASTM C666, 2008; etc.) nenhuma delas prevê a determinação específica da durabilidade para este tipo de materiais. Os estudos já efetuados (Velosa e Veiga, 2006; Lanas *et al.*, 2006; Rodrigues, 2004) são, normalmente, relativos a argamassas de reboco ou



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

de assentamento. Torna-se assim difícil a definição de ciclos de temperatura e humidade a que se vão submeter os provetes de calda. A investigação desenvolvida em vários países nesta área tem em conta, a maioria das vezes, as condições climáticas locais (Velosa e Veiga, 2006).

As condições climáticas sentidas em Portugal são, em geral, moderadas. Em algumas regiões, principalmente no interior do país ou em zonas de maior altitude, podem ser atingidas temperaturas entre -7°C a -9°C , enquanto que as zonas costeiras raramente registam temperaturas negativas e, quando isso acontece, elas ocorrem na gama de -1°C a -3°C . Quanto a temperaturas máximas habituais, um valor de 40°C pode ser estabelecido como limite superior para todo o território (Velosa e Veiga, 2006). Usando estes dados, o equipamento e recursos disponíveis, foram escolhidos dois ciclos: um ciclo com uma temperatura mínima de -10°C e máxima de 35°C , para avaliar situações mais extremas de temperaturas negativas e um ciclo com uma temperatura mínima de 10°C e máxima de 50°C , para avaliar situações mais extremas de temperaturas positivas.

4.2. Equipamentos e procedimentos de ensaio

Para a realização de ensaios de envelhecimento acelerado foram utilizadas duas câmaras climáticas programáveis - *Fitoclima 1000 ECP45* e *Fitoclima 700EDTU*, ambas da marca *Aralab*. Estes equipamentos funcionam para as seguintes condições, ver Tabela 1.

Tabela 1 – Principais características das câmaras climáticas usadas no programa experimental

	<i>Fitoclima 1000 ECP45</i>	<i>Fitoclima 700EDTU</i>
Temperatura	$-45^{\circ}\text{C}/180^{\circ}\text{C}$ ($\pm 0.5^{\circ}\text{C}$)	$2^{\circ}\text{C}/50^{\circ}\text{C}$
Humidade relativa	10%/98% ($\pm 2\%$)	15/98%
Volume útil	1000litros	700litros

Construíram-se 108 provetes com a calda comercial *Ma* e uma pedra granítica do tipo amarelo, os quais foram devidamente acondicionados em câmara húmida durante 90 dias ($T=20^{\circ}\text{C}$; $Hr\approx 95\%$), e posteriormente separados em três grupos. Dois desses grupos com 36 provetes cada um, foram colocados em câmara climática, parte dos quais sujeitos ao procedimento de ensaio designado por T_1 e outros sujeitos ao procedimento designado por T_2 , ver Tabela 2.



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

Os dois ensaios apenas diferem na gama de temperaturas usadas. A duração dos ciclos e valor da humidade relativa do ar, que se manteve constante durante todo o ensaio (95%), foi igual para ambos os testes. Com estes dois tipos de ensaios será possível comparar resultados e verificar se a degradação se deve a temperaturas elevadas, a temperaturas mais baixas ou a ambas.

Tabela 2 – Características dos dois tipos de ensaios utilizados

Nº de provetes ensaiados	Ensaio	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Duração do ciclo (horas)	Humidade relativa (%)	Nº de ciclos efetuados
36	T1	50	10	6	95	252
36	T2	35	-10	6	95	252

Para observação do decréscimo do desempenho das caldas relativamente à aderência é necessário, então, a realização dos ensaios de aderência sobre os provetes envelhecidos durante períodos de tempo sucessivamente maiores. A variação dos valores da tensão de rotura à tração por aderência com o número de ciclos de envelhecimento a que os provetes ficam sujeitos é que irá permitir observar a degradação desta característica ao longo do tempo (Sá, 2005). O espaço de tempo entre cada ensaio, assim como a duração de permanência dos provetes nas câmaras esteve condicionado à disponibilidade dos equipamentos e também aos resultados sucessivamente obtidos.

De modo a ser possível uma comparação de resultados e uma avaliação do grau de degradação da calda *Ma* sujeita a ensaios de envelhecimento acelerado, o terceiro grupo de provetes permaneceu em câmara húmida até aos 180 dias de idade.

4.3. Apreciação dos resultados

Apresentam-se na Fig. 3 os resultados de ensaios de tração calda/pedra obtidos aos 28, 60, 90, 150 e 180 dias, em provetes acondicionados em câmara húmida até ao dia do ensaio (envelope a cinza claro) assim como os resultados de ensaios de tração calda/pedra obtidos em provetes sujeitos aos procedimentos T₁ e T₂ (curva a cinza escuro). Nos provetes sujeitos aos procedimentos T₁ e T₂ optou-se por realizar ensaios de tração calda/pedra após 1, 2 e 3 semanas de exposição. Os ensaios foram posteriormente executados com um intervalo de tempo de duas semanas até completar nove semanas em câmara climática. Foram realizados seis ensaios de cada vez. Os seis resultados obtidos foram avaliados segundo o procedimento



descrito na norma ASTM E178-02 (2002) de modo a eliminar, ou não, valores extremos, pois alguns resultados pareciam se desviar dos restantes em valor para o mesmo tipo de amostra. Os resultados obtidos foram ponderados, visto que nenhum deles foi considerado como sendo um “outlier”. Sendo assim, nos gráficos da Fig. 3 estão representadas as dispersões de valores verificadas (banda entre valores máximos e mínimos) e a curva média ajustada.

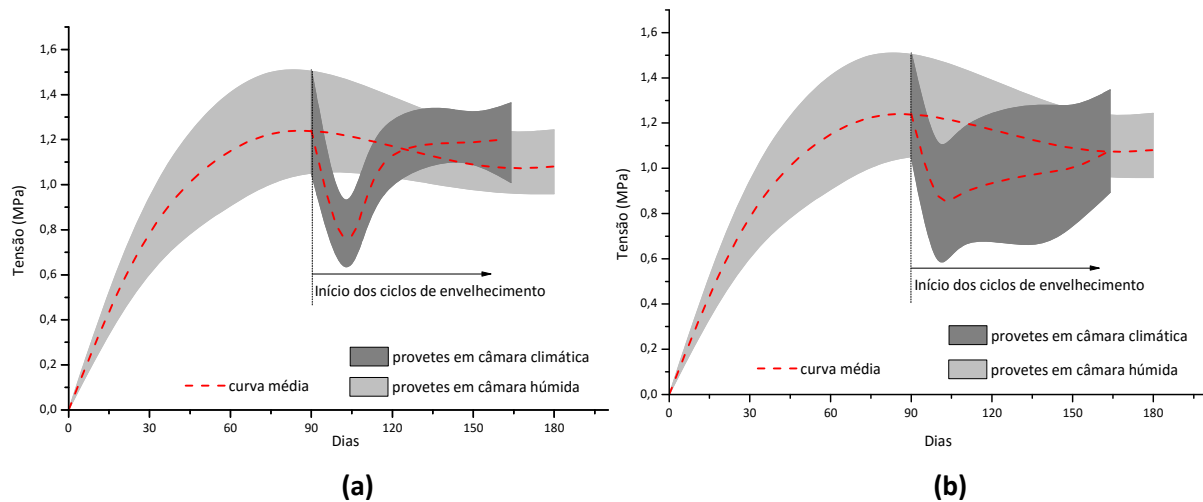


Fig. 3 – Resultados de ensaios de tração em provetes sujeitos a ciclos: (a) T1 e (b) T2

Percebe-se pelos gráficos que as condições de temperatura e humidade afetam, numa fase inicial, a estrutura interna das caldas fazendo decair significativamente a tensão de tração para valores médios da ordem dos 0,8MPa. Curiosamente, por volta dos 150 dias de idade, os valores obtidos parecem ter uma tendência para se igualarem não apresentando diferença significativa nos resultados obtidos para ambos os procedimentos. Parece haver, no entanto, uma diferença no tipo de rotura entre os provetes sujeitos a T_1 e T_2 .

Relativamente ao tipo de rotura verificado em provetes sujeitos a uma cura em câmara húmida, ou seja, não sujeitos a ensaios de envelhecimento, pode concluir-se o seguinte: (i) aos 28 e 60 dias de idade, a rotura é predominantemente pela interface. Pontualmente, quando existe alguma fissuração, dá-se algum desprendimento pela calda; (ii) aos 90 dias, a rotura dá-se pela interface ou pedra, onde se verifica, na pastilha de calda, uma perda de fragmentos de granito numa área aproximadamente de 40 a 50%; (iii) a partir dos 150 dias de idade, a rotura é maioritariamente pela pedra, verificando-se um aumento significativo dos grãos que ficam aderentes à calda. Um exemplo de cada tipo de rotura verificado aos 60, 90, 150 e 180 dias de idade, está apresentado na Tabela 3.

De modo semelhante estão apresentados na Tabela 4 os tipos de rotura verificados em provetes sujeitos aos procedimentos T_1 e T_2 . Fazendo uma análise comparativa, salienta-se



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

o seguinte: (i) entre os provetes sujeitos a ciclos $10^{\circ}\text{C}/50^{\circ}\text{C}$ e os provetes em câmara húmida, parece não haver diferenças significativas entre o modo de rotura. Em ambos os casos aparentemente existe uma boa aderência da calda ao granito; (ii) no caso dos provetes em câmara climática com ciclos $-10^{\circ}\text{C}/35^{\circ}\text{C}$, a rotura verificada em provetes a partir dos 135 dias de idade (ensaios às 7 e 9 semanas de envelhecimento) foi maioritariamente pela calda.

Este aspeto parece indicar que os ciclos usados com temperatura de -10°C afetaram em parte a microestrutura da calda levando à rotura mecânica por tração do material, algo que não tinha sucedido em ensaios anteriores. Apesar disso, os valores encontrados são muito satisfatórios parecendo indicar não haver decréscimo da capacidade aderente da calda ao fim dos 252 ciclos. No entanto, o decréscimo da tensão de tração por aderência verificado nas três primeiras semanas e a posterior subida carece de um estudo mais aprofundado que esclareça este comportamento. Os resultados obtidos podem depender da resistência à tração da pedra, dos coeficientes de dilatação dos materiais, do coeficiente de endurecimento de calda ou de outros fatores que limitam os valores encontrados.

Tabela 3 – Aspeto das caldas após ensaio de tração sem envelhecimento













	Idade (dias)			
	60	90	150	180
Provetes em câmara húmida				

Tabela 4 – Aspeto das caldas após ensaio de tração com envelhecimento

	Idade (dias) / Tempo em câmara climática (semanas)			
	104 / 2	125 / 5	139 / 7	146 / 9
Provetes em câmara climática com teste T_1				
Provetes em câmara climática com teste T_2				



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

5. CONCLUSÕES

Neste estudo avaliou-se a durabilidade de uma das caldas comerciais, a calda *Ma*. Em particular, pretendeu-se avaliar o decréscimo da capacidade de aderência da calda em suporte de pedra granítica, sujeitando os provetes a temperaturas mais gravosas que as verificadas, normalmente, em Portugal e de uma forma cíclica simulando um ensaio de envelhecimento acelerado. Os resultados parecem ser inconclusivos já que no final de 252 ciclos completos (1512 horas em câmara climática) os valores obtidos não revelaram a existência de degradação, apesar de se ter verificado um decréscimo de resistência nas duas primeiras semanas. Uma das grandes dificuldades deste tipo de estudos é que não há correlação entre o número de ciclos de envelhecimento artificial acelerado e o tempo real de envelhecimento, e desconhece-se, portanto, se o número de ciclos efetuados corresponde a um tempo de vida útil do material também satisfatório. Comparando, por exemplo, com a durabilidade de aplicações de colagens com epoxy em tijolo e betão, tem-se verificado que o período de exposição para um suporte fraco é suficiente e para um suporte forte é insuficiente. Perante estes resultados, é essencial prosseguir o estudo desenvolvido eventualmente com a execução de mais provetes idênticos e prolongamento dos ensaios cíclicos até se atingir um valor crítico de referência a partir do qual se considere que a capacidade de aderência da calda não é satisfatória. Estes resultados preliminares indicam que a aderência da calda é pouco sensível ao envelhecimento por alteração das condições ambientais.

6. REFERÊNCIAS

- ASTM C666 / C666M – 03, 2008. Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing
- ASTM E178-02, 2002. Standard Practice for Dealing with Outlying Observations
- Izaguirre, A.; Lanas, J.; Álvarez, J., 2010. Behaviour of a starch as a viscosity modifier for aerial lime-based mortars, *Carbohydrate Polymers* 80, 222-228
- Kalagri, A.; Miltiadou-fezans, A.; Vintzileou, E., 2010. Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stine masonry historic structures, *Materials and Structures* (43): 1135-1146
- Lanas, J.; Sirera, R.; Alvarez, J., 2006. Study of the mechanical behavior of masonry repair lime-based mortars cured and exposed under different conditions, *Cement and Concrete Research*, (36): 961-970
- Luso, E., 2012. Análise Experimental de Caldas à Base de Cal para Injeção de Alvenaria Antiga, Tese de doutoramento, Universidade do Minho.
- Luso, E.; Lourenço, P.B., 2014. Consolidação e reforço de paredes antigas de alvenaria de pedra. Injeção com caldas, *Rehabend 2014*, Santander
- Rilem TC 127-MS. 1998. Tests for masonry materials and structures. MS-A.3 Uni-directional freeze-thaw test for masonry units and wallethes
- Rodrigues, M. P., 2004. Argamassas de Revestimento para Alvenarias Antigas. Contribuição para o estudo da influência dos ligantes, PhD Tese, UNL, Lisboa
- Sá, A. M., 2005. Durabilidade dos cimentos-cola, Tese de Mestrado, FEUP



IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL
DE ENGENHARIA CIVIL

- Shannag, M., 2002. High-Performance Cementitious grouts for Structural repair, *Cement and concrete Research*, (32): 803-808
- Silva, G., 2004. Influence of environmental aging on properties of polymeric mortars, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 461-468
- Silva, M.; Silva, Z.; Simão, J., 2007. Petrographic and mechanical aspects of accelerated ageing of polymeric mortars, *Cement and Concrete Composites*, 29, 146-156
- Toumbakari, E., 2001. Lime-Pozzolan-Cement Grouts and their Structural Effects on Composite Masonry Walls, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium.
- Velosa, A.; Veiga, M., 2006. Development of artificial ageing tests for renders – application to conservation mortars. *Proceedings of 7th International Brick Masonry Conference (7 IBMAC)*. London
- Velosa A., Veiga R., 2007. Lime-metakaolin Mortars – Properties and Applications, *Sustainable Construction, Materials and Practices. Challenges of the Industry for the New Millennium*, Lisboa, IST.