

CODE 233**ESTUDO COMPARATIVO DE UMA CALDA COMERCIAL E UMA ELABORADA
“IN-SITU” PARA REFORÇO E CONSOLIDAÇÃO DE ALVENARIA ANTIGA****Luso, Eduarda¹**

1: ISISE – Institute for Sustainability and Innovation in Structural Engineering, IPB, eduarda@ipb.pt

PALAVRAS CHAVE: Caldas de injeção, alvenaria, consolidação.**RESUMO**

A injeção de caldas fluidas é uma das técnicas possíveis para trabalhos de consolidação estrutural das paredes de alvenaria de pedra. No entanto, um dos seus maiores problemas, para além da reversibilidade, consiste precisamente na escolha da argamassa ou calda de injeção a usar. Pela grande facilidade de preparação, as caldas ditas comerciais (produtos pré-doseados aos quais é necessário apenas adicionar água), são preferidas às caldas doseadas e preparadas “in-situ” visto necessitarem de menos mão-de-obra e menos equipamento para a sua elaboração. No entanto, a utilização de caldas comerciais tem algumas desvantagens, fundamentalmente do ponto de vista económico além de apresentarem nas respetivas fichas técnicas uma informação limitada o que dificulta a comparação direta entre materiais. Neste trabalho pretende-se comprovar que composições com proporções adequadas de metacaulino, cimento e cal hidratada, plastificante e água, podem ter características muito semelhantes ou até superiores a alguns dos produtos comerciais disponíveis no mercado. O presente trabalho tem como objetivo a comparação das propriedades reológicas, físicas (textura e cor) e mecânicas de uma das caldas comerciais estudadas com uma das várias composições feitas em laboratório, bem como um estudo económico, demonstrando que constituem uma possível alternativa às caldas comerciais existentes no mercado.

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 [1].

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 Figura 1. A escolha do tipo de calda a utilizar é uma das grandes dificuldades desta técnica, devido a requisitos como baixo módulo de elasticidade e resistência adequada, bem como um comportamento físico e quimicamente compatível com os materiais existentes. Com base no desempenho exigido da estrutura, a composição da calda deve melhorar o comportamento do sistema injetado sem afetar a durabilidade. O uso de misturas de cimento-pozolana-cimento tem vindo a ser uma das opções mais atraentes [2] e tem sido avaliadas experimentalmente em laboratório em paredes de um e três panos [2, 3, 4] revelando um resultado muito satisfatório.

Perante estas particularidades na escolha da calda mais apropriada, é comum a opção pela via mais fácil, pelo que têm sido amplamente utilizados os produtos pré-doseados disponíveis no mercado para este fim, em trabalhos de reforço em alvenaria de pedra ou tijolo.



Figura 1: Exemplos de injeções em paredes de alvenaria de pedra ou tijolo

Especialmente formulados para este fim, as caldas comerciais garantem uma maior uniformidade nas propriedades e um melhor controlo de qualidade. A informação técnica geralmente é escassa e não está claro quais os padrões que devem ser utilizados para o controlo e quais os requisitos aplicáveis, o que significa que a decisão de escolher um produto geralmente é baseado na tendência do mercado, custo e disponibilidade local. Várias aplicações de caldas para consolidação "in situ" e resultados de testes laboratoriais estão disponíveis na literatura [5, 6, 7, 8]. Um exemplo de aplicação prática para a consolidação das torres da Catedral do Porto é dado em [9].

O objetivo deste trabalho baseia-se essencialmente na comparação de duas caldas, de entre várias estudadas anteriormente nomeadamente as caldas comerciais em [10] e as formulações em laboratório em [11]. O programa experimental consistiu numa análise comparativa numa primeira fase, da fluidez, exsudação e segregação, resistência à flexão e compressão. Na segunda fase do programa experimental testa-se a injetabilidade das caldas em meio granular, bem como a resistência à compressão e resistência à tração dos cilindros resultantes do ensaio anterior e por fim a determinação da aderência ao suporte.

2. AS CALDAS COMERCIAIS E FORMULAÇÕES EM LABORATÓRIO

Tal como já referido o sucesso da técnica de injeção para reforço e consolidação de alvenarias antigas assenta em grande parte nas características do material a injetar. Uma possível 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. Os produtos comerciais disponíveis para utilização específica em paredes de alvenaria antiga são em número reduzido. No entanto, foram escolhidos quatro desses produtos (o *Mape-Antique I*, da empresa *Mapei*, *Albaria Iniezione* da empresa *Basf*, o *Calce per Consolidamento* da marca *Tradibau* e o *Lime-Injection* da marca *Tecnochem*) e submetidos a um extenso programa experimental em laboratório [4]. Os quatro produtos escolhidos apresentaram características, por vezes, bem diferentes, seja em termos de propriedades mensuráveis através dos ensaios, como também em termos de cor, textura e trabalhabilidade. Para este trabalho em particular foi escolhida a calda *Mape-Antique I*, (designado neste estudo por *Grout A*) visto ter sido a que melhores resultados apresentou em termos de aderência ao suporte, propriedade fundamental para o sucesso de intervenções por injeção.

Uma outra possível opção é o uso de caldas à base de cal-pozzolana-cimento, pelo facto de terem apresentado em vários trabalhos de investigação [2, 4] muito boas propriedades. Em [11] pode ver-se que várias composições, alterando percentagens de constituintes e usando vários ligantes, apresentaram boas características a nível de comportamento reológico, exsudação e resistências mecânicas, contudo, a maioria delas, principalmente aquelas onde a percentagem de cimento foi nula, revelaram resultados muito fracos em termos de aderência. No entanto, de entre mais de uma centena de composições estudadas, a mistura composta por 35% cal hidratada, 30% de cimento e 35% de metacaulino, aos quais se adicionou 3,33% de superplastificante *SRI* (da Marca *Mapei*) e 60% de água (designado neste estudo por *Grout B*), demonstrou ter uma capacidade de aderência semelhante ao *Grout A*.

É relativamente a estas duas caldas em particular que neste artigo se faz foco e se pretende comparar em termos de resultados obtidos em ensaios semelhantes em laboratório.

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para verificar o desempenho dos materiais de construção, é comum avaliar o seu comportamento em condições laboratoriais. A primeira fase do trabalho experimental descrito neste estudo consistiu na determinação do tempo de fluxo através do cone Marsh, execução de ensaios de exsudação em cilindros graduados com 100 ml de capacidade e, finalmente, moldagem de provetes prismáticos de $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ para ensaios de flexão e compressão na idade de 28, 90, 180, 360 e 1100 dias.

A segunda fase incluiu uma série de ensaios das caldas com pedra granítica do tipo amarelo, nomeadamente ensaios de injetabilidade em cilindros com altura de 300mm e diâmetro de 150mm, ensaios de compressão diametral e uniaxial aos cilindros calda/pedra após 28 dias de cura e ensaios de aderência. A preparação dos provetes e os procedimentos de ensaio estão descritos em [4, 10] e resumidos na Tabela 1.

Tabela 1: Resumo dos ensaios realizados no programa experimental

Ensaio		Resumo
Fluidez	Adaptado de ASTM C939 (2010) [12] e EN 445 (2008) [13]	Determinação do tempo de escoamento de um litro de calda através de um cone Marsh de dimensões determinadas, imediatamente após a mistura e 30 e 60 minutos depois.
Segregação/ Exsudação	Adaptado ASTM C940 (2010) [14] e EN 445 (2008) [13]	Medição da quantidade de água que aparece na superfície de um determinado volume de calda.
Resistência à flexão	Adaptada de EN 196-1 (2005) [15]	Ensaio de flexão em provetes prismáticos de $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$
Resistência à compressão	Adaptada de EN 196-1 (2005) [15]	Ensaio à compressão dos meios provetes obtidos após rotura dos provetes $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ durante os ensaios de flexão.
Injetabilidade	Adaptada de NF P 18 (1986) [16]	Avaliação da capacidade da calda para passar através de uma coluna de um determinado agregado pétreo.
Caracterização mecânica de cilindros com calda+pedra	LNEC E397 (1993) [17] e ASTM C469 (2010) [18]	Ensaio de resistência à compressão sob controlo de deslocamento axial, para determinação do módulo de elasticidade, energia de fratura e índice de ductilidade.
Aderência	Sem norma	Determinação da força máxima que deve ser aplicada numa área circular de calda aplicada a um suporte de pedra.

4. COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Efetuada os ensaios, os resultados revelam algumas semelhanças em algumas das propriedades. É de realçar que todos os gráficos apresentados em seguida mostram a média obtida em pelo menos três ou seis amostras, para cada ensaio e para cada calda. Relativamente à fluidez, pode verificar-se no gráfico (a) da Figura 2, que a calda comercial tem um maior tempo de escoamento que calda formulada em laboratório. A calda *Grout A*, também apresentou uma exsudação de aproximadamente 2% e enquanto que o *Grout B* praticamente nula, ver gráfico (b) da Figura 2.

Numa propriedade em que são muito semelhantes estas duas caldas é na sua resistência mecânica, quer à compressão quer à flexão. Realizaram-se ensaios até aos três anos de idade, de modo a perceber a evolução do endurecimento ao longo do tempo, primeiro por se tratarem de caldas à base de cal e por outro para verificar se o metacaulino interferiria negativamente nesta característica, algo que já tinha acontecido noutras composições [4]. Na Figura 3, pode ver-se que tanto os valores obtidos em ensaios de flexão como de compressão são muito semelhantes nas duas caldas.

Devido à diferença de tempo de escoamento nos ensaios de fluidez, também nos ensaios de injetabilidade se encontraram diferenças nas duas caldas para o tempo de enchimento dos moldes cilíndricos com granito amarelo, ver Figura 4. Valores quatro vezes superiores para a calda *Grout A* em comparação com *Grout B*, o que vai um pouco de acordo com os resultados do ensaio de fluidez, não se verificando alteração mesmo sob pressão.

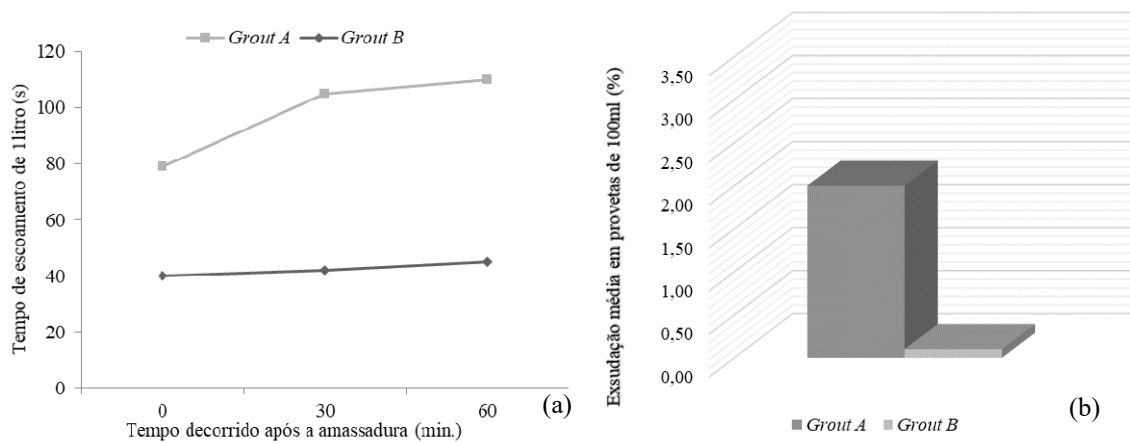


Figura 2: Resultados dos ensaios de fluidez (a) e de ensaios de exsudação/segregação (b)

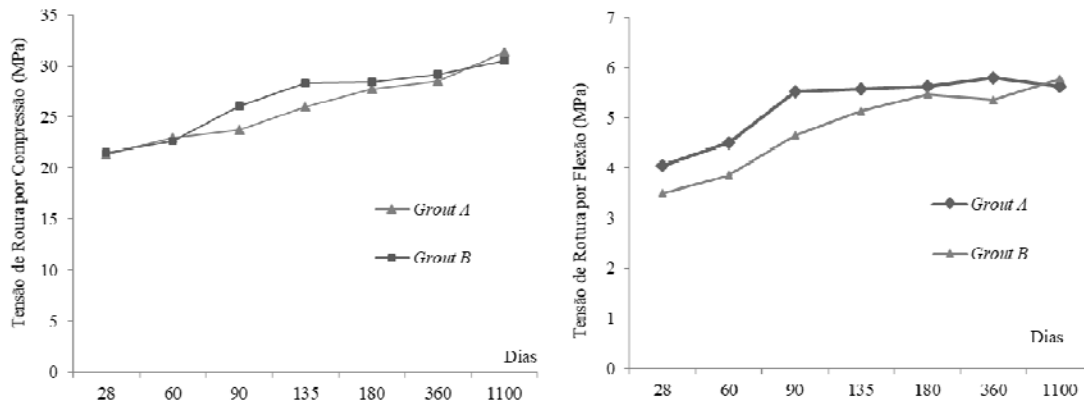


Figura 3: Resultados de ensaios à compressão e flexão

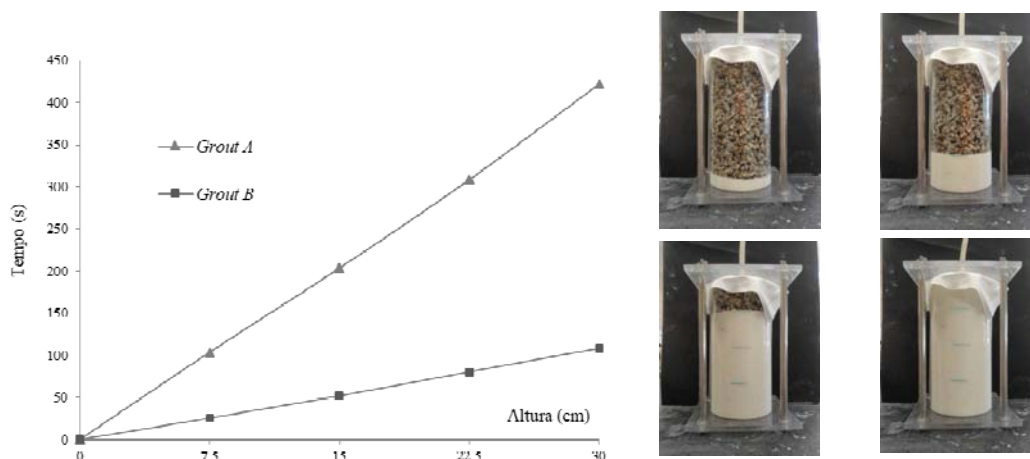


Figura 4: Tempo médio de enchimento dos provetes cilíndricos

Depois de remover os moldes, os cilindros cheios com pedra e calda foram curados numa câmara húmida durante 28 dias. Posteriormente, foram realizados ensaios de compressão uniaxial em três dos cilindros e ensaios de compressão diametral nos outros três cilindros. Os ensaios de resistência à compressão (f_c) foram realizados sob controlo de deslocamento axial ($5\mu\text{m/s}$), o que permitiu a caracterização do

comportamento do material após a obtenção da carga máxima (pós pico), nomeadamente obtendo a energia de fratura (G_f) e a índice de ductilidade ($du = G_f/f_c$), ver [4, 10, 11] para obter mais detalhes. A Tabela 2 mostra a média dessas propriedades juntamente com o módulo de elasticidade (E) e os correspondentes coeficientes de variação entre parênteses. Além disso, a última coluna mostra a relação entre resistência à tração e compressão (f_t/f_c).

Tabela 2: Resultados obtidos em ensaios mecânicos. Coeficiente de variação entre parênteses (%)

Calda	Idade (dias)	f_c (MPa)	E (GPa)	G_f (N/mm)	d_u (mm)	f_t (MPa)	f_t/f_c
<i>Grout A</i>	28	23.5 (6.1)	17.3 (16.9)	32.0 (9.4)	1.37 (13.7)	2.1 (4.7)	9%
<i>Grout B</i>	28	13.9 (6.7)	7.3 (11.7)	23.2 (11.2)	1.64 (5.1)	1.30 (5.0)	9%

Comparando os valores da energia de fratura em compressão resultantes destes ensaios para as duas caldas em estudo com os valores descritos no Modelo Código 90 (CEB - FIP, 1993) [19], parece haver algum acordo razoável, ver Figura 5. A energia de fratura proposta no código segue a equação (1).

$$G_{f_c} = 15 + 0,43f_c - 0,0036f_c^2 \quad (1)$$

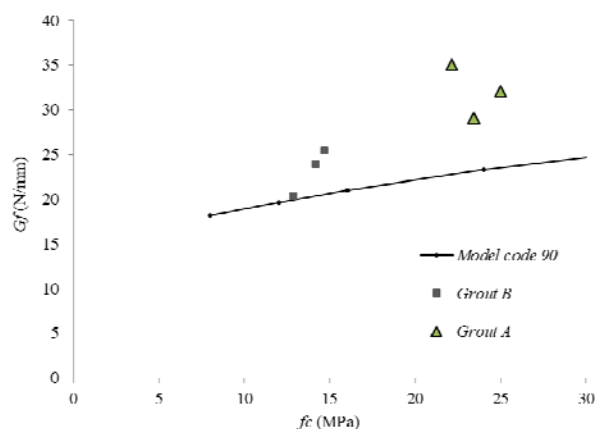


Figura 5: Relação entre resistência à compressão (f_c) e energia de fratura (G_f)

Por último, os resultados dos ensaios de aderência feitos com pedra granítica do tipo amarelo, mostram valores interessantes para ambas as caldas pois de entre todas as misturas ensaiadas quer comerciais quer as formulações em laboratório estas duas foram de facto as que obtiveram melhor comportamento em ensaios de arrancamento, ver Figura 6. Foi observado igualmente, ao contrário dos outros provetes, uma rotura pela “pedra”, quer para a calda comercial quer para a calda formulada em laboratório, o que parece transparecer uma boa ligação física entre o suporte e a calda para estas duas misturas.

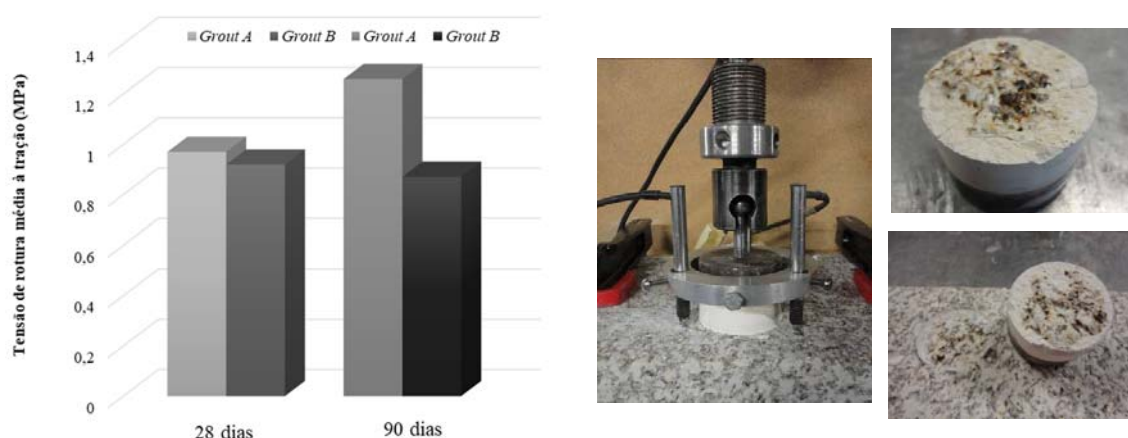


Figura 6: Resultados obtidos em ensaios de aderência aos 28 e 90 dias de idade; Aspeto do esquema de ensaio; Tipo de rotura “pedra” em ambas as caldas

Em conclusão, a calda *Grout B* formulada em laboratório parece satisfazer os requisitos necessários para ser utilizada como material de injeção, pois obteve resultados semelhantes, quer em ensaios físicos quer em mecânicos, aos de uma calda comercial amplamente usada em toda a Europa em trabalhos desta espécie. Resta agora perceber se será vantajoso do ponto de vista económico a substituição da calda comercial por uma elaborada “in-situ” como seja a calda *Grout B*. Uma análise do custo desta calda em comparação com a calda comercial é indicada na Tabela 3 a título de exemplo, para Portugal e para o ano de 2015. Para essa análise de custos, foram tidos em conta, o custo da calda e o custo do trabalho manual, que naturalmente difere. As caldas preparadas “in-situ” implicam uma maior coordenação do trabalho, maior tempo de preparação e exigem a presença em obra de uma balança. O tempo de preparação e mistura foi estimado em 2 min / kg de material para o *Grout B*, ou seja, o dobro do tempo considerado para o *Grout A* (1 min / kg de material). O custo do trabalho manual foi assumido 10 € / hora. Do ponto de vista económico, o *Grout B* apresenta, mesmo assim, um custo muito menor (quase 60% menos do custo da calda comercial *Grout A*), mesmo usando metacaulino, que tem um custo por quilograma muito maior do que o cimento.

Tabela 3: Análise de custos

Calda	Preço médio de cada componente por kg				Total/ kg	Total/litro	Custo Relativo
	Cal Hidratada	Cimento Branco	Metacaulino Optipozz-Sc	Plastificante SR1			
<i>Grout A</i>					0,650€	0,929€	1,0
<i>Grout B</i>	0,188€	0,246€	0,74€	0,85€	0,427€	0,403€	0,43

5. CONCLUSÕES

O desenvolvimento duma pesquisa laboratorial, da qual uma parte se apresenta no presente trabalho, contribuiu de forma muito positiva para a aquisição de um conhecimento empírico do comportamento de cada um dos materiais utilizados, através do seu manuseamento direto, e o melhoramento dos conhecimentos acerca do seu comportamento mecânico, físico e reológico, quando utilizados em composições bi ou tri-compostas, através da realização dos diversos ensaios.

A conclusão principal que se pode retirar desta experiência é que é possível a elaboração de caldas à base de cal “in-situ” com características adequadas para injeção de estruturas antigas de alvenaria de pedra. Os resultados revelam muitas semelhanças entre as caldas comerciais e as que foram desenvolvidas em laboratório. Em particular, uma das composições apresentou boas características a nível de comportamento reológico, exsudação e resistências mecânicas, e inclusive em termos de aderência, o que pode constituir uma boa alternativa às caldas comerciais. A adição de pozolanas naturais ou artificiais tem sido encorajada por muitos autores como uma substituição potencial para o cimento. A adição de pozolanas pode ajudar a melhorar a durabilidade, se adequadamente usadas [20] e o uso de superplastificante é também recomendado. Em particular, com 35% de cal, 30% de cimento branco e 35% de metacaulino, elaborou-se uma calda (*Grout B*) com muitas semelhanças à calda comercial escolhida para este trabalho (*Grout A*). Em termos de fluidez e exsudação, a calda (*Grout B*) teve um melhor desempenho, assim como no tempo de injeção em meio granular. As resistências das caldas à compressão e à flexão são muito idênticas mesmo após mais de mil dias de cura. Finalmente, um dos parâmetros que mais preocupava, a capacidade de aderência ao suporte, foram conseguidos valores idênticos em ambas as caldas.

No entanto, estas misturas têm diferentes densidades, tanto quanto húmidas e secas (1830 kg/m^3 para calda comercial e 1530 kg / m^3 para formulação “in-situ”), o que acaba por influenciar também os resultados obtidos no módulo de elasticidade e resistência à compressão nos cilindros com pedra, onde valores maiores foram obtidos.

Do ponto de vista económico, a formulação *Grout B* parece ter um custo relativo menor em relação à mistura *Grout A*, o que constitui uma vantagem enorme. A desvantagem de usar diferentes componentes para a formulação das caldas “in-situ” é a possível variabilidade de suas características, dentro de uma determinada classe, o que significa que não há garantia de propriedades uniformes em comparação com o esperado de uma composição pré-misturada. Portanto, recomenda-se testar uma composição prescrita antes da aplicação. Outra desvantagem de usar uma calda feita “in-situ” é a necessidade de uma pesagem adequada dos materiais e uma adequada mistura, o que pode alterar significativamente as propriedades do produto final, caso não haja controlo adequado.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Luso, E., Lourenço, P. B. *Avaliação da Degradação de Caldas de Injeção em Ensaios de Envelhecimento Artificial*, II Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão, LNEC, Lisboa, 27-29 setembro, 2016
- [2] Toumbakari, E. *Lime-Pozzolan-Cement Grouts and their Structural Effects on Composite Masonry Walls*, PhD Thesis, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 2002
- [3] Toumbakari, E.; Van Gemert, D.; Tassios, T.; Vintzileou, E. *Experimental investigation and analytical modelling of the effect of injection grouts on the structural behaviour of three-leaf masonry walls*, 4th International Seminar on Structural Analysis of Historical Constructions, Padova, Italy, 707-717, 2004
- [4] Luso, E. *Experimental analysis of lime based grouts for the ancient masonry injections*, PhD Thesis, University of Minho, Portugal. Available from <http://hdl.handle.net/1822/23073>, 2012
- [5] Binda, L.; Baronio, G.; Tiraboschi, C.; Tedeschi, C. *Experimental research for the choice of adequate materials for the reconstruction of the Cathedral of Noto*, Construction and Building Materials (17): 629-639, 2003
- [6] Kalagri, A.; Miltiadou-fezans, A.; Vintzileou, E. *Design and evaluation of hydraulic lime grouts for the strengthening of stone masonry historic structures*, Materials and Structures (43): 1135-1146, 2010

- [7] Silva, R. *Experimental characterization of masonry: strengthening and long term effects*, Master Thesis, University of Minho (in Portuguese), Portugal. Available from <http://hdl.handle.net/1822/9036>, 2008
- [8] Valluzi, M. *Comportamento meccanico di murature consolidate con materiali e tecniche a base di malte*, PhD Thesis, Università degli Studi di Trieste, Italy, 2000
- [9] Lourenço, P.B.; Ramos, L.F.; Krakowiak, K.J. *Cathedral of Porto, Portugal: Conservation works 2003-2008*, Proceedings of 11th Canadian Masonry Symposium, Toronto, Ontario, Canada, CD-ROM, 20 pp, 2009
- [10] Luso, E., Lourenço, P. B. *Experimental characterization of commercial lime based grouts for stone masonry consolidation*. *Construction and Building Materials*, 102, 216-225, 2016
- [11] Luso, E., Lourenço, P. B. *Experimental laboratory design of lime based grouts for masonry consolidation*, *International Journal of Architectural Heritage*, 11.8 1143-1152, 2017
- [12] ASTM C939-10 *Standard Test Method for Flow of Grout for Preplaced-Aggregate Concrete (Flow Cone Method)*, 2010
- [13] EN 445. *Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio*, IPQ, 2008
- [14] ASTM C940 -10^a. *Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory*, 2010
- [15] EN 196-1. *Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*, IPQ, 2006
- [16] NF P 18-892. *Produits spéciaux destinés aux constructions en béton hydraulique. Produits pour injections dans des structures en béton. Essai de fendage d'éprouvettes cylindriques de mortier provenant de l'injection d'une colonne de sable*, 1986
- [17] E 397. *Betões. Determinação do módulo de elasticidade em compressão*, LNEC, 1993
- [18] ASTM C469 / C469M-10. *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, 2010
- [19] Ceb-fip model code 90. *Design Code, Comité euro-international du béton*, Thomas Telford, 1993
- [20] Massazza, F. *Pozzolana and pozzolanic cements*, Lea's Chemistry of Cement and Concrete, Hewlett P. C. Editor, Elsevier, 1998