

CONSOLIDAÇÃO E REFORÇO DE PAREDES ANTIGAS DE ALVENARIA DE PEDRA. INJEÇÃO COM CALDAS

Luso, Eduarda¹, Lourenço, Paulo B.²

1: Instituto Politécnico de Bragança, Portugal
e-mail: eduarda@ipb.pt, web: <http://www.ipb.estig.pt>

2: Universidade do Minho, Portugal
e-mail: pbl@civil.uminho.pt, web: <http://www.civil.uminho.pt>

PALAVRAS-CHAVE: Reabilitação, Alvenaria, Injeção, Caldas.

RESUMO

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 de construção antigos, 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. Isto requer a identificação das deficiências e a aplicação de técnicas de intervenção apropriadas. No caso particular de intervenções em edifícios antigos, a primeira opção a considerar deve ser a conservação dos materiais existentes, se necessário recorrendo a reparações pontuais, ou a operações de consolidação, mas preservando a integridade do edifício.

Uma das técnicas possíveis para trabalhos de consolidação estrutural das paredes de alvenaria de pedra é a injeção de argamassas fluidas. Esta técnica é uma técnica passiva que restitui a integridade ao edifício e melhora a sua capacidade resistente. Um dos problemas desta técnica, para além da reversibilidade, é a escolha da argamassa ou calda de injeção a usar. Os produtos comerciais com este fim apresentam na respetiva ficha técnica informação diferenciada, que dificulta a comparação direta. Além disso, em alguns deles, a informação disponibilizada é limitada pelo que as argamassas fluidas têm sido aplicadas sem conhecimento total das suas propriedades. A decisão na escolha 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.

Apresenta-se neste trabalho a caracterização do comportamento de quatro caldas comerciais para injeção em alvenaria antiga, em termos de propriedades reológicas e mecânicas, obtida através da realização de ensaios experimentais em laboratório.

1. INTRODUÇÃO

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 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. No reforço e consolidação de alvenaria pela técnica de injeção o preenchimento completo e uniforme da alvenaria com caldas são essenciais [1] para o sucesso da intervenção. Mas o preenchimento dos vazios no interior da alvenaria deteriorada não é um desafio fácil, pois são vários os parâmetros que estão envolvidos. A distância entre os orifícios, a pressão de injeção, as propriedades reológicas das caldas, a capacidade de absorção de água e a condição geral da alvenaria (quantidade de fendas e a sua espessura) são fatores muito importantes [2].

Baseado no desempenho necessário da estrutura, a formulação da calda deve promover o melhoramento das propriedades mecânicas do sistema injetado sem desvalorizar a durabilidade. O uso de caldas à base de cal-pozolana-cimento parece ser uma das opções mais atrativas [3], apresentando, potencialmente, muito boas propriedades. A modelação das caldas permanece ainda uma ação empírica mas a eficácia dessas composições ficou já provada em estudos experimentais efetuados a paredes de um e três panos [4]; [3]; [5], [6].

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. Destes materiais pouco se sabe, além do publicitado pelo fabricante e da informação, por vezes escassa, das respetivas fichas técnicas.

Sendo assim, o programa experimental apresentado neste trabalho pretende dar resposta a uma série de questões pertinentes comparando as propriedades de algumas caldas de injeção comercializadas em Portugal, caracterizando o seu comportamento físico, reológico e mecânico. Em particular, pretende-se uma análise da capacidade de aderência das caldas a vários tipos de substrato comuns em edifícios antigos existentes em Portugal. Para tal foram escolhidos quatro produtos comerciais disponíveis no mercado nomeadamente o *Mape-Antique I*, da empresa *Mapei*, o *Albaria Iniezione* da empresa *Basf*, o *Calce per Consolidamento* da marca *Tradibau* e o *Lime-Injection* da marca *Tecnochem*. Destaca-se o facto de se ter optado por uma designação simbólica para cada produto (*A*, *B*, *C* e *D* respetivamente) para que, desta forma, seja mais simples a leitura no texto seguinte.

2. REQUISITOS DAS CALDAS DE INJEÇÃO

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. Outras propriedades deverão ser ajustadas a cada caso, como sejam: necessidade de desenvolvimento da resistência nos primeiros dias; existência ou não de agregado na composição da calda, devido à existência ou não de vazios de grande dimensão; possuir resistências mecânicas e módulo de elasticidade ajustáveis às características da alvenaria de modo a absorver tensões em vez de as transferir para a alvenaria; propriedades térmicas semelhantes, entre outros. A avaliação do desempenho dos quatro produtos comerciais *A*, *B*, *C* e *D* foi realizada através da execução de uma série de ensaios laboratoriais. Pretende-se, no final, fazer uma análise comparativa dos resultados de forma indicativa e qualitativa.

3. CAMPANHA EXPERIMENTAL

3.1 Ensaios de Fluidez

A fluidez é uma propriedade muito importante das caldas que poderá estar relacionada diretamente com uma das funções principais das caldas de injeção – o preenchimento, no interior das alvenarias, do maior

número de vazios possível. Para determinar a fluidez das caldas de injeção comerciais disponíveis procedeu-se à realização de ensaios com um funil cónico de dimensões normalizadas e calibradas (vulgarmente conhecido por cone de Marsh) e registou-se o tempo de escoamento de determinado volume de calda. Procedeu-se à realização dos ensaios com os quatro produtos comerciais *A*, *B*, *C* e *D*. Foram realizados seis séries de ensaios com cada um dos produtos e fazendo-se variar a temperatura da água de amassadura e ambiente (10°C, 20°C e a 30°C).

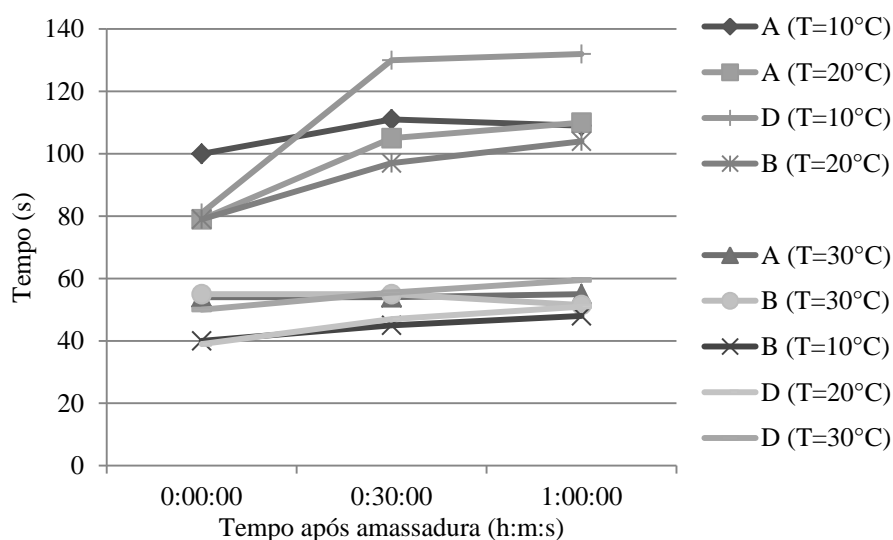


Figura 1: Tempo de escoamento para temperaturas de 10°C, 20°C e 30°C (água e ambiente)

Os valores obtidos nesta campanha de ensaios revelam resultados muito idênticos para as caldas *A*, *B* e *D* a 30°C, e ainda para *B* e *D*, a 10°C e 20°C, respetivamente, variando todos entre os 40 e os 60s, mesmo após decorridos 60min desde a amassadura. A 10°C o produto *B* apresenta o menor tempo de escoamento, parecendo que se comporta melhor a temperaturas baixas. O produto *A* apresenta um tempo de fluidez consideravelmente maior para 10 e 20°C, tendo tido melhores resultados a 30°C. O produto *D* também duplica o tempo de escoamento para a temperatura de 10°C e o *B* apresenta piores resultados a 20°C. Relativamente ao produto *C*, foi praticamente impossível encontrar um valor médio do tempo de escoamento no cone para qualquer uma das temperaturas usadas. Na maioria das vezes o escoamento da calda parou ao fim de algum tempo após o início do ensaio.

3.2 Ensaios de Exsudação/Segregação

Enchendo um recipiente com uma mistura de ligantes hidrófilos com água, pode verificar-se, ao longo do tempo, o aparecimento de água à superfície da suspensão, com uma linha de separação água-calda, por vezes, muito nítida, e com a altura da água crescendo com o tempo, pelo menos na fase inicial do processo. No caso das caldas de injeção, este fenómeno prejudica em parte, a qualidade da injeção destes materiais, pois a parte superior de um poro injetado pode não ficar consolidada devido a esta migração de água em excesso para essa zona. Os ensaios descritos neste item foram realizados conforme a norma NP EN 445 (2008) [7] e o estabelecido na norma da ASTM 940 (2010) [8].

A norma NP EN 447 (2008) [9] especifica que após 3 horas do fim da amassadura a exsudação deverá ser inferior a 2% do volume inicial. Segundo [10] considera-se excessivo quando a exsudação é superior a 5%. De qualquer forma, todos se incluem dentro dos valores limite sugeridos por [10] sendo o produto *A* o que apresentou uma maior percentagem de exsudação, embora dentro dos limites aceitáveis, talvez por ter

sido o material no qual a medição da quantidade de água à superfície ter sido mais facilitada pela separação clara entre o material e água à superfície, ver Figura 2.

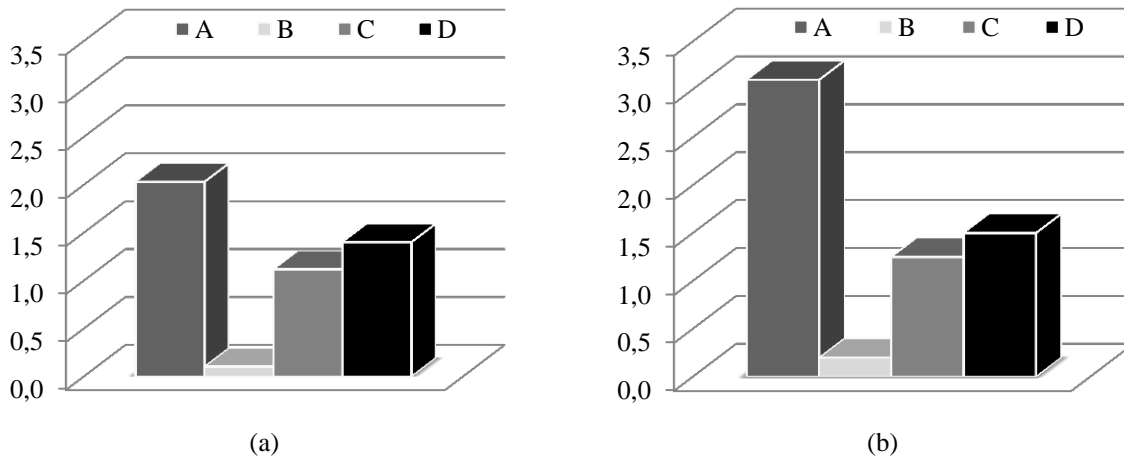


Figura 2: Exsudação média (%): (a) segundo a norma NP EN 445 (2008) ao fim de três horas; (b) segundo a norma ASTM 940 (2010) ao fim de 24h (exceto para B)

3.3 Ensaios de Flexão e Compressão

De modo a caracterizar mecanicamente a resistência destas caldas, bem como a evolução do seu endurecimento ao longo do tempo, moldaram-se provetes prismáticos de $16 \times 4 \times 4 \text{ cm}^3$ com as quatro caldas disponíveis com o objetivo de realizar ensaios à compressão e à flexão (28, 90, 180 e 360 dias), ver Figura 3. A resistência à compressão de caldas de injeção neste ensaio é medida, para cada calda, em seis meios-prismas obtidos por rotura à flexão de três prismas. O procedimento de ensaio seguiu o estipulado em NP EN 445 (2008) [7] e em investigações semelhantes [11] [12] ligeiramente adaptado da norma NP EN 196-1 (2006) [13], usada para argamassas de cimento. Devido à fluidez das caldas de injeção, os provetes, neste caso, não foram compactados.

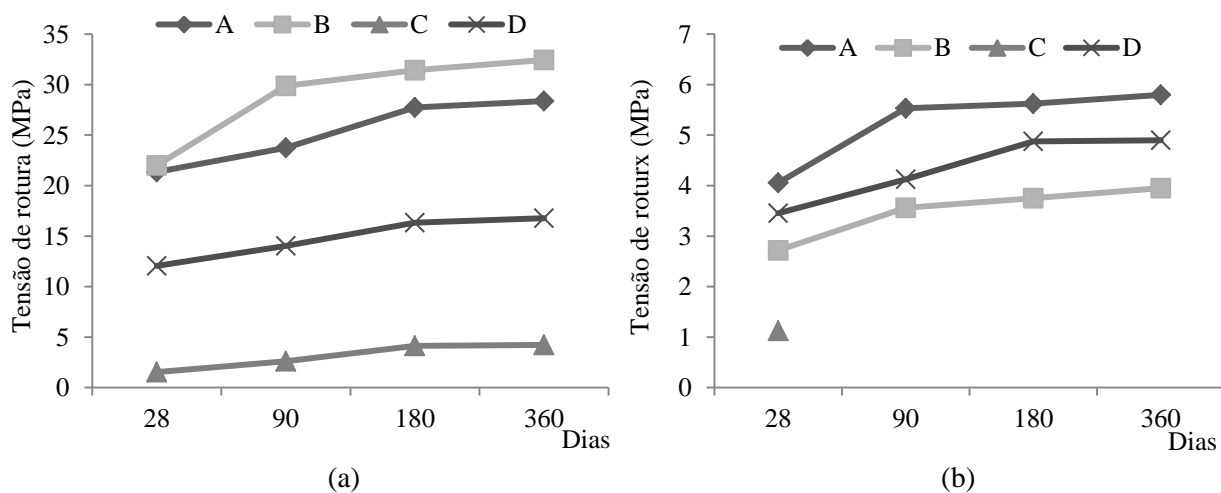


Figura 3: Valores médios da resistência à: (a) compressão, em seis provetes; (b) flexão, em três provetes (exceto para C)

Em geral, a resistência à compressão das caldas selecionadas aumentou com o tempo. Os produtos *B* e *A* apresentam maior resistência à compressão do que o *D* e o *C*, sendo este último o que apresenta valores menores de tensão de rotura. Todos os valores parecem estabilizar decorridos 180 dias de cura. Na resistência à flexão, o valor máximo é obtido para o produto *A* seguido do *D*.

3.4 Ensaios de Injetabilidade

Com esta pesquisa experimental inicia-se a segunda parte do programa de ensaios que engloba a caracterização de comportamentos das caldas comerciais face a diferentes tipos de pedra.

Pretendeu-se com estes ensaios determinar a capacidade de injeção de uma calda no seio de material granular de diferente natureza. Com base na revisão bibliográfica e após alguns ensaios prévios, construíram-se moldes cilíndricos em material acrílico, com altura de 300mm e diâmetro de 150mm. As pedras granulares usadas no preenchimento dos moldes foram o xisto, o granito amarelo e o calcário moliano, de forma a utilizar amostras mais ou menos representativas das pedras naturais usadas na construção de edifícios em alvenaria em Portugal.

Depois do enchimento dos moldes com os diversos materiais granulares, foi elaborada a calda de cada produto, com a água à temperatura de 20°C, amassadas durante exatamente 10 minutos, usando procedimento idêntico ao efetuado para os ensaios de fluidez anteriores.

A pressão utilizada para enchimento dos cilindros foi de 1,5atm mantida constante devido à utilização de um equipamento de injeção conhecido por “pressure pot”. O tempo necessário para o enchimento total dos cilindros para cada produto comercial e para as diferentes pedras utilizadas foi então registado em cada série de ensaios.

Para melhor visualização dos resultados obtidos nestes ensaios de injetabilidade com os quatro produtos comerciais, apresenta-se na Figura 4 o tempo médio que cada produto gastou no enchimento total dos moldes, preenchidos com xisto, granito amarelo e calcário, com um volume de vazios superior a 50%.

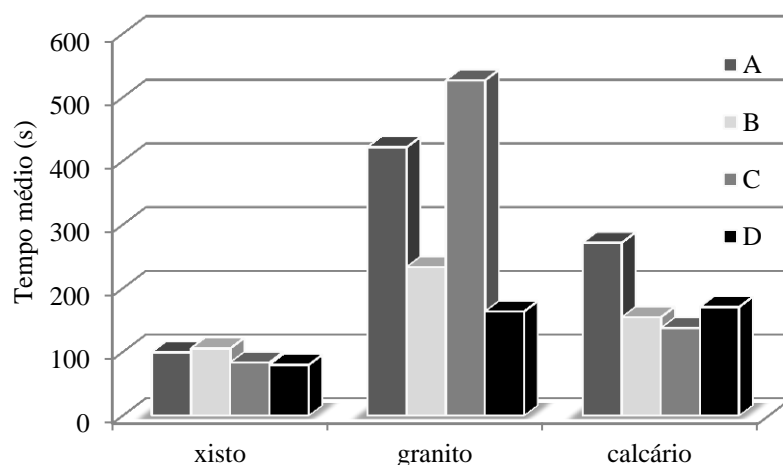


Figura 4: Valores médios do tempo de enchimento total de moldes cilíndricos

Após desmoldagem, os provetes foram submetidos a cura em câmara húmida durante 28 dias e 90 dias, altura em que se procedeu a ensaios de compressão uniaxial em três deles, enquanto os restantes foram sujeitos a ensaios de compressão diametral. Os resultados obtidos nestes ensaios poderão ser analisados em [6].

3.5 Ensaios de Aderência

Tendo em conta a importância da aderência das caldas de injeção na eficácia desta técnica de consolidação e reforço, e sabendo da existência de estudos limitados que lidam com esta questão em paredes de alvenaria de pedra [14], surgiu a necessidade de um estudo sistemático acerca deste tema. Optou-se por quantificar a tensão de aderência calda/pedra em ensaios de arrancamento. O ensaio de arrancamento consistiu na determinação da força de tração máxima que é necessário aplicar numa área circular, com cerca de 48mm de diâmetro de calda aplicada sobre o suporte.

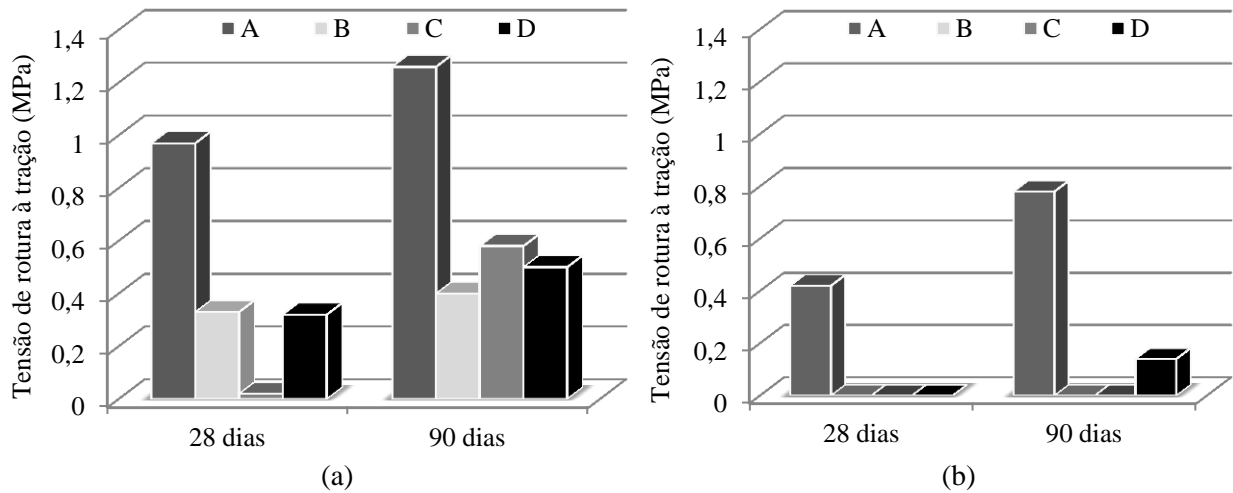


Figura 5: Tensão de rotura média à tração com: (a) granito “húmido” e (b) calcário “húmido”

A análise dos resultados parece indicar que são obtidos melhores resultados com o granito no estado “húmido”, comparativamente com os obtidos em peças “secas” e “saturadas”, ver Figura 5 e 6. Foi obtido, precisamente, o máximo valor de tensão de rotura de todos os ensaios para o granito amarelo no estado “húmido”, aproximando-se de alguns dos valores encontrados na literatura. Foi obtida uma tensão de aderência de 1,26MPa aos 90 dias de idade. No estado “saturado” (granito e calcário) foram obtidos resultados relativamente fracos.

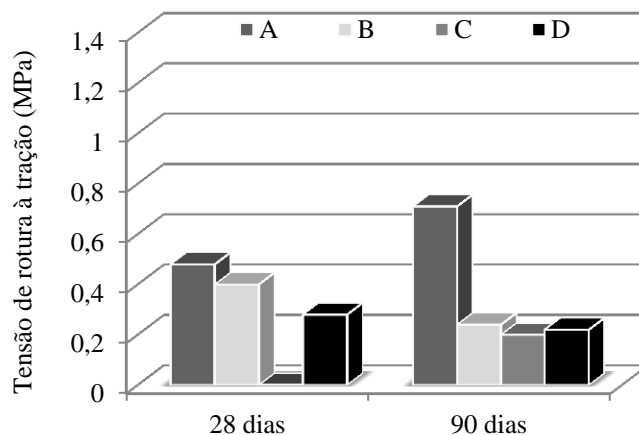


Figura 6: Tensão de rotura média à tração com xisto “húmido”

4. CONCLUSÕES

Com o objetivo de resumir os resultados obtidos e, principalmente, comparar comportamentos entre as quatro caldas comerciais, construiu-se a Tabela 2, meramente indicativa e qualitativa. Não se pretende qualificar as caldas individualmente, mas pretende-se apenas fazer uma análise comparativa que resume os resultados obtidos nesta campanha experimental. Salientam-se os seguintes aspetos: (i) considerou-se a classificação de melhor “++” para pior “±”, sendo “-” inadequado; (ii) considerou-se a classificação máxima para valores de resistência maiores, embora se saiba que não é a propriedade condicionante e que resistências elevadas poderão até ser prejudiciais; (iii) o mesmo para a resistência à compressão calda+pedra. Salienta-se ainda que a maior parte dos ensaios adotados não estão perfeitamente normalizados, pelo que os resultados devem ser apreciados com alguma reserva. De qualquer forma, o conhecimento destes resultados constitui certamente uma ajuda preciosa na altura de optar por um ou por outro produto e na redação, por exemplo, de um caderno de encargos.

Tabela 1: Classificação qualitativa dos quatro produtos comerciais com base nos ensaios efetuados

		A	B	C	D
Fluidez	10°C	+	++	-	+
	20°C	+	+	±	++
	30°C	++	++	-	++
Exsudação		±	++	+	+
Injetabilidade (Vv > 50%)	Xisto	++	++	++	++
	Granito	+	+	±	++
	Calcário	±	++	++	++
Resistência à compressão da calda					
	28 dias	++	++	±	+
Resistência à compressão calda/pedra (28 dias)	Xisto	++	++	±	+
	Granito	++	++	±	+
	Calcário	++	++	±	+
Aderência em pedra húmida (28 dias)	Xisto	++	+	-	±
	Granito	++	±	-	±
	Calcário	++	-	-	±

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Schueremans L. *Probabilistic evaluation of structural unreinforced masonry*, Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, KULeuven, 2001
- [2] Van Rickstal, F. *Grout injection of masonry, scientific approach and modeling*, International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, Vol 7(34): 407-432, 2001
- [3] Toumbakari, E. *Lime-Pozzolan-Cement Grouts and their Structural Effects on Composite Masonry Walls*, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 2001

- [4] Toumbakari, E.; Vintzileou, E.; Pisano F.; Van Gemert D. *Experimental investigation of three-leaf masonry walls*, Proc. 1st National Congress on “Mild interventions and protection of historic structures”, Thessaloniki, Greece, 2000
- [5] 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
- [6] Luso, E. *Análise Experimental de Caldas à Base de Cal para Injeção de Alvenaria Antiga*, Tese de doutoramento, Universidade do Minho, 2012
- [7] NP EN 445 *Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Métodos de ensaio*, IPQ, 2008
- [8] ASTM C940 -10a. *Standard Test Method for Expansion and Bleeding of Freshly Mixed Grouts for Preplaced-Aggregate Concrete in the Laboratory*, 2010
- [9] NP EN 447. *Caldas de injeção para armaduras de pré-esforço. Requisitos básicos*, IPQ, 2008
- [10] Vintzileou, E. *Grouting of Three-Leaf Stone Masonry: Types of Grouts, Mechanical Properties of Masonry before and after Grouting*, Structural Analysis of Historical Constructions, Lourenço P. B., Roca P., Modena C., Agrawal S. (eds), New Delhi, 2006
- [11] Valluzi, M. *Comportamento Meccanico di Murature Consolidate Con Materiali e Tecniche a Base di Calce*, Tesi de Dottorato, Università Degli Studi di Trieste, 2000
- [12] Toumbakari, E. *Lime-Pozzolan-Cement Grouts and their Structural Effects on Composite Masonry Walls*, PhD Thesis, Department of Civil Engineering, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium, 2002
- [13] NP EN 196-1 *Métodos de ensaio de cimentos. Parte 1: Determinação das resistências mecânicas*, IPQ, 2006
- [14] Adami, C.; Vintzileou, E. *Interventions to historic masonries: Investigation of the bond mechanism between stones or bricks and grouts*, Materials and Structures (41): 255-267, 2006