

Propostas de melhoramento do comportamento mecânico de paredes antigas de granito do Porto

Proposals for the improvement of the mechanical behavior of old granite walls from Porto

Celeste Almeida
João Miranda Guedes
António Arêde
Anibal Costa

Resumo

A reabilitação de edifícios antigos é um tema de grande atualidade. A complexidade destas construções e a necessidade de encontrar técnicas de intervenção adequadas, continua a despertar grande interesse no seio da comunidade científica e técnica. Neste âmbito, foi realizada uma campanha de ensaios experimentais (de compressão e de corte cíclico com compressão constante) em modelos à escala real construídos em laboratório, respeitando as técnicas construtivas utilizadas *in situ*, e foram quantificados os seus parâmetros mecânicos. Utilizando uma das tipologias ensaiadas, foram posteriormente estudadas duas propostas para o melhoramento do comportamento estrutural destas paredes, que agora se apresentam: (i) alteração do processo construtivo e (ii) injeção de argamassa nas juntas. Dois novos modelos de paredes foram construídos e submetidos à campanha de ensaios referida. A análise e comparação destes resultados com os obtidos nos modelos originais mostrou que as duas propostas apresentadas melhoram significativamente o desempenho estrutural destas alvenarias.

Abstract

The rehabilitation of old buildings is a current topic. The complexity of these constructions and the need to find suitable intervention techniques continues to cause great interest within the scientific and technical community. For this purpose, a campaign of experimental tests (compression and cyclic shear-compression) was carried out on real scale specimens built in the laboratory, respecting the *in situ* construction techniques, to quantify their mechanical parameters. Using one of the tested typologies, two proposals for the improvement of the structural behaviour of these walls were later studied and the results are herein presented: (i) changing the walls construction process and (ii) injecting the joints with mortar. With this aim, two new wall specimens were built and submitted to the same testing campaign. The analysis and comparison of the results with those obtained in the original specimens show the two proposals improve significantly the structural performance of these masonry walls.

Palavras-chave: Alvenaria de granito / Ensaio de compressão e corte / Parâmetros mecânicos / Melhoramento

Keywords: Granite masonry / Shear and compression tests / Mechanical parameters / Improvement

Celeste Almeida

CONSTRUCT-LESE – Faculdade de Engenharia,
Universidade do Porto
UFP, Porto
Portugal
celestea@ufp.edu.pt

João Miranda Guedes

CONSTRUCT-LESE – Faculdade de Engenharia,
Universidade do Porto
FEUP, Porto
Portugal
jguedes@fe.up.pt

António Arêde

CONSTRUCT-LESE – Faculdade de Engenharia,
Universidade do Porto
FEUP, Porto
Portugal
aarede@fe.up.pt

Aníbal Costa

RISCO – Departamento de Engenharia Civil
da Universidade de Aveiro
UA, Aveiro
Portugal
acosta@ua.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

ALMEIDA, C. [et al.] – Propostas de melhoramento do comportamento mecânico de paredes antigas de granito do Porto. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 17. ISSN 2183-8488. (novembro 2021) 7-14.

1 Introdução

A intervenção em edifícios antigos continua a constituir um grande desafio, em particular quando se pretendem definir estratégias de atuação em paredes de alvenaria de pedra. Apesar de se assistir a uma crescente atividade de investigação em Portugal, a comunidade técnica ainda evidencia dificuldades na caracterização mecânica destes elementos, bem como na avaliação do seu comportamento recorrendo a modelos numéricos. As dificuldades são ainda mais acentuadas quando se pretende aferir o melhoramento do desempenho estrutural pela aplicação de técnicas de reabilitação/reforço. A entrada em vigor da Portaria n.º 302/2019, de 12 de setembro, realça ainda mais a importância e a necessidade de investigação nesta área.

O recurso a ensaios experimentais *in situ* ou em laboratório constitui o melhor meio para avaliar o comportamento dos materiais e dos elementos estruturais no seu conjunto [1, 2]. Neste sentido, e no âmbito de uma tese de doutoramento, foi definido um vasto programa de ensaios experimentais em paredes reais de alvenaria de pedra de folha única e protótipos construídos em laboratório, respeitando as técnicas construtivas originais de paredes comuns em edifícios antigos da cidade do Porto. Esta campanha, realizada no Laboratório de Engenharia Sísmica e Experimental (LESE) da FEUP, permitiu numa primeira fase compreender o comportamento estrutural destes elementos face a ações solicitantes no seu plano (de compressão e de corte com compressão), que se mostrou ser fortemente determinado pelo processo construtivo deste tipo de alvenarias e, simultaneamente, condicionado pela forma dos blocos e pelas características do material de enchimento das juntas (argamassa, calços e vazios). A partir deste conhecimento, foi possível propor e ensaiar duas estratégias de intervenção que permitissem melhorar o comportamento estrutural desta tipologia de alvenarias, nomeadamente: i) alterar o procedimento construtivo, eliminando a presença de calços entre os blocos de pedra, em situações onde se propõe a construção ou a reconstrução deste tipo de paredes e ii) injetar com caldas as juntas de forma a consolidar a parede.

Relativamente à injeção com caldas, diversos autores concluíram que a aplicação desta técnica em paredes de alvenaria de pedra de folha múltipla com enchimento garante melhorias significativas do comportamento estrutural das paredes [4, 5, 6]. A normativa italiana [3] contém, inclusivamente, coeficientes corretivos a aplicar aos parâmetros mecânicos das alvenarias caso se adote esta, ou outras técnicas de melhoramento. No entanto, escasseiam estudos, ou referências deste tipo dirigidos à injeção de juntas de paredes de granito de folha única como as analisadas neste artigo, lacuna que este trabalho pretende também colmatar.

2 Modelos de paredes

O programa experimental envolveu a construção de dois modelos de parede de granito de folha única com 7,20 m de desenvolvimento, 1,80 m de altura e 0,28 m de espessura, respeitando uma das tipologias construída e previamente ensaiada no LESE e identificada como tendo textura Parcialmente Regular (PR), tal como se descreve em [7]. Estes dois modelos, designados como Parcialmente Regular Sem Calços (PR_SC) e Parcialmente Regular INjetado (PR_INJ),

foram construídos de forma a representar cada uma das duas propostas de melhoramento do comportamento estrutural: o primeiro à alteração do processo construtivo e o segundo à injeção das juntas com caldas apropriadas.

A tipologia PR_SC corresponde a uma alvenaria de aparelho parcialmente regular com pedras assentes sem calços e utilizando uma argamassa comercial (Malta de Alletamento 770 da Fassa Bortolo), com melhores características mecânicas que as argamassas originais (Figura 1a). A sua construção procurou minimizar os vazios no interior da secção transversal (típicos das paredes originais e que resultam também da utilização de calços no assentamento das pedras) mediante a colocação de uma camada contínua de argamassa antes do assentamento das pedras. Em contrapartida, a tipologia PR_INJ foi construída de forma a respeitar os procedimentos construtivos e de disposição dos blocos de pedra de paredes originais de alvenaria de pedra granítica, i.e. com calços e argamassa de fecho das juntas (cal área hidratada e saibro, com traço 1:3) colocada à posteriori, criando vazios no interior da secção transversal (Figura 1b), que, após noventa dias de cura, foram preenchidos através de injeção com uma calda comercial (Legante Iniezioni 790 da Fassa Bortolo). Os trabalhos de injeção foram realizados pela empresa STAP, S.A..

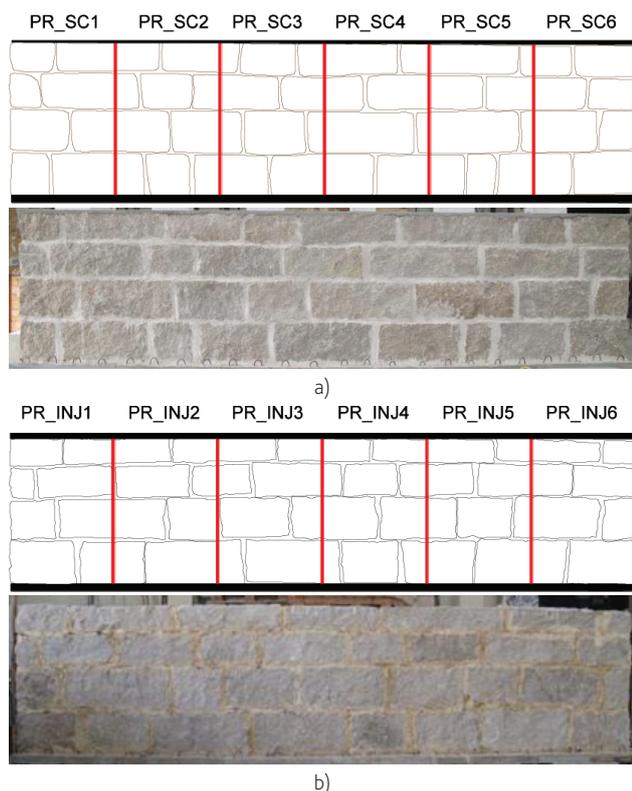


Figura 1 Modelos das paredes: a) tipologia PR_SC e b) tipologia PR_INJ

O granito utilizado foi proveniente de uma pedreira do Norte e procurou-se que fosse semelhante ao utilizado na tipologia PR ensaiada previamente e que serviu de termo de comparação,

nomeadamente no tipo de grão e nas propriedades mecânicas. Na construção da parede PR_SC e na injeção da parede PR_INJ foram aplicadas argamassas pré-doseadas da “Linha de Restauro Ex Novo” da Fassa Bortolo. Esta linha é constituída por uma série de argamassas com diferentes aplicabilidades (assentamento, chapisco, reboco, acabamento e injeção). Cerca de um mês após a injeção do painel PR_INJ, as duas paredes foram individualizadas em seis painéis com 1,20m de largura (linhas de corte marcadas a vermelho e designação dos painéis indicada na Figura 2), recorrendo a um disco de serra diamantada previamente fixo numa régua guia. Após o corte e individualização dos painéis, foi possível analisar a constituição da secção transversal, (Figura 2).

Como se pretendia, nos modelos PR_SC as juntas entre pedras encontravam-se praticamente preenchidas por argamassa. Por outro lado, na tipologia PR_INJ verificou-se que a argamassa de injeção conseguiu preencher os vazios interiores, evidenciando a eficácia do processo de injeção no preenchimento dos vazios internos num painel de folha simples com 7,20 m de desenvolvimento.

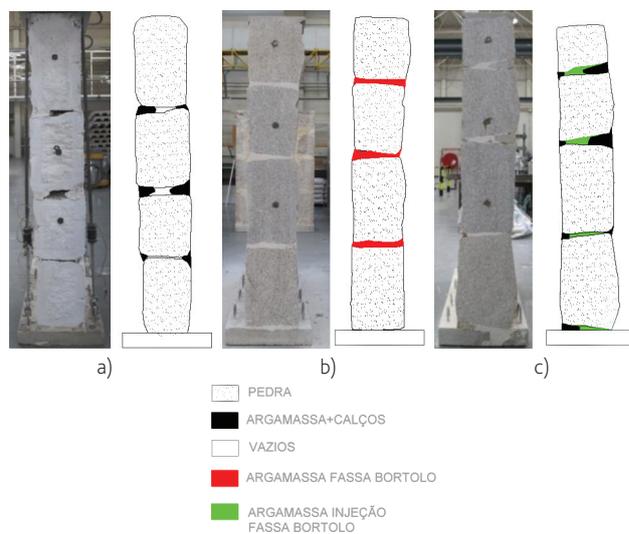


Figura 2 Secção transversal dos diferentes modelos de paredes: a) PR, b) PR_SC e c) PR_INJ

3 Ensaios de compressão

3.1 Programa experimental

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados no LESE, sendo a carga vertical aplicada por dois atuadores com capacidade máxima total de 3,0 MN (Figura 3a). Paralelamente, foi necessário recorrer a uma prensa com maior capacidade (10MN) disponível no Laboratório de Ensaios de Materiais de Construção (LEMC) da FEUP (Figura 3b).

Três painéis de parede PR_SC e três painéis PR_INJ foram submetidos a ensaios de compressão uniaxial: os painéis PR_SC1 e PR_INJ1 a ensaios monotónicos de modo a estimar a resistência à compressão (LESE), e os restantes painéis (PR_SC2; PR_SC3; PR_INJ2 e PR_INJ3) foram inicialmente submetidos a ciclos de carga e descarga para

avaliar o módulo de elasticidade (LESE) e só posteriormente foram levados à rotura (LEMC). Os painéis foram instrumentados com 4 LVT verticais posicionados em ambas as faces, junto às extremidades dos painéis, 2 LVT horizontais posicionados a meio da parede de forma a medir a abertura de juntas verticais e outros LVT dispostos na perpendicular às juntas horizontais.

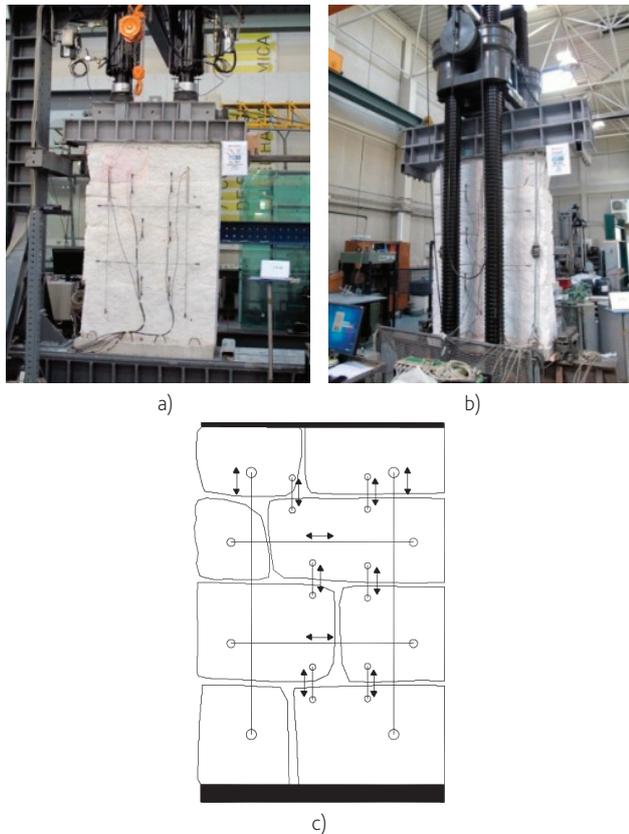


Figura 3 Ensaio de compressão uniaxial dos painéis PR_SC e PR_INJ: a) no LESE, b) no LEMC e c) esquema geral de instrumentação

3.2 Análise de resultados

Em termos de danos e modos de rotura, o padrão de fissuração observado nas paredes PR_SC e PR_INJ foi semelhante. Os primeiros danos ocorreram para um nível tensão vertical superior a 9 MPa e, genericamente, iniciaram com o destacamento de argamassa das juntas, seguido da formação de linhas de rotura tendencialmente alinhadas com as juntas verticais. A rotura foi igualmente visível na secção transversal e, nalguns casos, verificou-se a delaminação de pedras. Ambas as paredes exibiram uma rotura brusca após a demarcação de uma linha de rotura ao longo da altura da parede. Comparativamente com o padrão de fissuração observado na tipologia PR, verificou-se que estas novas paredes apresentaram menor número de fissuras para um nível de tensão muito superior (Figura 4).

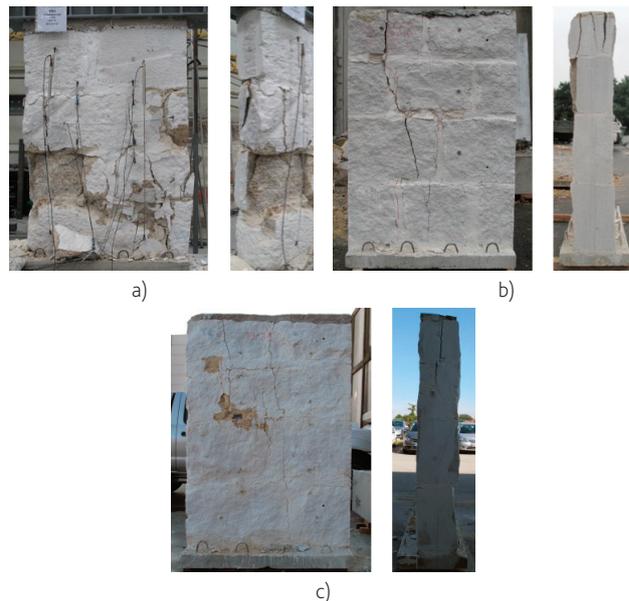


Figura 4 Modo de rotura das paredes: a) PR_1, b) PR_SC2 e b) PR_INJ1

A quantificação de parâmetros de resistência e de deformabilidade foi realizada a partir dos valores médios obtidos por tipologia, e os parâmetros mecânicos analisados dizem respeito às tensões associadas às primeiras fissuras (σ_{cr}), à resistência à compressão (f_{cp}) e ao módulo de elasticidade de recarga (E_{cp}). Os resultados obtidos encontram-se indicados na Tabela 1.

Tabela 1 Síntese das propriedades mecânicas à compressão das paredes

Modelo	σ_{cr} [MPa]	f_{cp} [MPa]	E_{cp} [GPa]	$k = E_{cp} / f_{cp}$
PR	3,57	4,14	1,16	280,19
PR_SC	10,71	14,50	9,25	637,93
PR_INJ	9,33	12,98	11,53	888,29

Da análise dos resultados é notório que a melhoria das características do material de assentamento, bem como da superfície de contacto entre pedras, proporciona um melhor funcionamento global das paredes. Efetivamente, em ambas as propostas foi visível o acréscimo de rigidez e de resistência relativamente à parede original. Em estudos semelhantes realizados em alvenarias de duas folhas com enchimento, o processo de injeção conduziu ao aumento de resistência e de rigidez de cerca de duas vezes [4]. Apesar da rotura do painel PR ter sido ligeiramente mais brusca que a registada nos PR_SC e PR_INJ, realça-se o carácter frágil associado a esta tipologia de alvenarias, uma vez que após o registo das primeiras fissuras a capacidade limite é rapidamente alcançada. Verificou-se, ainda, que o valor k obtido nas paredes PR_SC e PR_INJ na fase de recarga aproximou-se das relações indicadas na literatura: entre 500 a 1000. De referir, ainda, que os resultados evidenciados pelas duas novas

tipologias foram similares e conduziram a uma clara melhoria das características mecânicas destas alvenarias quando solicitadas por ações verticais. Deste modo, consistem, com campos de aplicação distintos, a duas técnicas de intervenção a utilizar em paredes com características idênticas às estudadas quando se pretende aumentar a sua capacidade resistente ou rigidez.

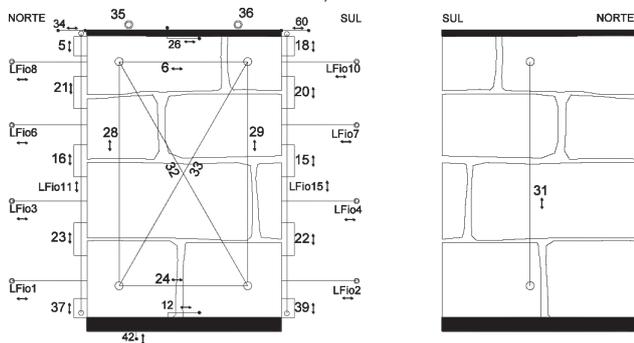
4 Ensaios de corte com compressão

4.1 Programa experimental

Os ensaios de corte com compressão constante foram realizados no pórtico de reação do LESE com a imposição no topo dos painéis de uma carga vertical que se manteve constante durante todo o ensaio, seguida da aplicação de deslocamentos horizontais cíclicos na direção do plano dos painéis (Figura 5). A instrumentação consistiu na aplicação de LVDTs e também transdutores de fio aplicados em ambas as faces da parede e ao nível da secção transversal, devidamente fixos às pedras.



a)



b)

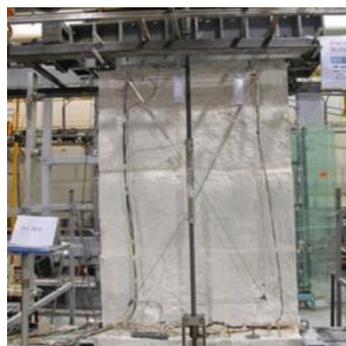
Figura 5 Ensaio de corte com compressão da parede PR_SC4: a) no LESE e b) esquema geral de instrumentação

Foram realizados três ensaios de corte cíclicos no plano por cada tipologia de parede, nomeadamente nos painéis referenciados como 4, 5 e 6, a que foram associados diferentes níveis de tensão vertical, $\sigma_0 = 0,4; 0,8; 1,2$ MPa, respetivamente. O primeiro nível de tensão pretende simular o estado de tensão presente em casos reais e os dois últimos pretenderam avaliar o comportamento destas

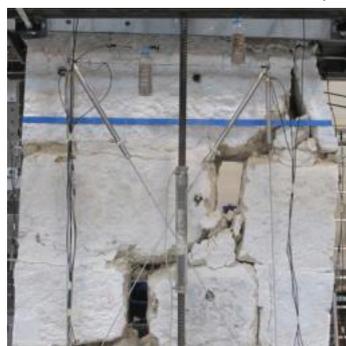
alvenarias em situações mais gravosas. Por outro lado, procurou-se que os níveis de tensão impostos conduzissem a diferentes modos de rotura. Foi adotada uma lei de deslocamentos com ciclos de amplitude crescente. Cada ciclo foi repetido três vezes, a fim de avaliar os efeitos de degradação da resistência e acumulação do dano.

4.2 Análise de resultados

A identificação dos mecanismos de dano foi realizada através da observação das linhas de rotura durante o ensaio e da análise dos deslocamentos registados pelos sensores colocados ao longo da secção transversal. Genericamente, o mecanismo de rotura nas paredes PR_SC e PR_INJ foi de *rocking* na base durante todo o ensaio e nos dois sentidos do movimento, até se alcançar o deslocamento máximo horizontal imposto de cerca de 53 mm (Figura 6a). Na tipologia PR o dano tinha iniciado com a rotura por corte diagonal, sendo acompanhado pela fissuração e delaminação de pedras (Figura 6b); os máximos deslocamentos registados tinham sido de 16mm para os painéis com tensão vertical de 0,4 MPa e de 30 mm para os painéis com tensão vertical de 0,8 e 1,2 MPa.



a)



b)



Figura 6 Estado dos painéis para o deslocamento máximo ($\sigma_0 = 0,4$ MPa): a) PR_SC4 e b) PR4

A partir dos diagramas histeréticos força-deslocamento e da aplicação de procedimentos de análise [7], foram quantificados: a resistência lateral na fase de fendilhação (H_c), a resistência lateral máxima (H_{max}), a ductilidade (μ), o *drift* e o coeficiente de amortecimento (ξ). Estes parâmetros permitem avaliar a eficácia

destas duas propostas de intervenção por comparação com a parede no seu estado original. A Figura 7 apresenta os diagramas força-deslocamento que caracterizam o comportamento histerético das paredes PR_SC4, PR_INJ4 e PR4 para o nível de tensão vertical de 0,4 MPa. Para as paredes melhoradas, as curvas são praticamente simétricas nos dois sentidos do movimento e apresentam a forma em S característica do mecanismo de rotura por *rocking*. Estas paredes possuem elevada capacidade de deformação, ao mesmo tempo que apresentam uma reduzida degradação de rigidez e dissipação de energia, mesmo após atingir o valor de pico da tensão. Por outro lado, o diagrama da parede PR4 exibe uma significativa assimetria na resposta, nomeadamente a partir do deslocamento horizontal de 5 mm, provavelmente devido ao deslizamento de pedras. No entanto, e apesar do dano registado, a perda de resistência no final do ensaio da parede PR4 em relação às restantes foi de apenas de cerca de 5.4%.

Na Figura 8 encontram-se representadas as curvas envolventes médias para todas as paredes ensaiadas. Destes diagramas realça-se a diferença entre o deslocamento último alcançado pelas paredes melhoradas face às originais. Em termos de capacidade resistente lateral, a variação foi pouco expressiva, estando esta grandeza, essencialmente dependente, da geometria dos painéis. Na Tabela 2 encontram-se resumidos os resultados desta análise.

Tabela 2 Parâmetros das curvas envolventes médias

Modelo de parede	σ_0 [MPa]	H_{cr} [kN]	$H_{máx.}$ [kN]	σ_{Corte} [MPa]	H_{dmax}	Drift [%]	ξ [%]
PR4		37,14	50,28	0,150	2,80	0,71	15,63
PR_SC4	0,4	53,54	62,26	0,185	6,14	2,74	7,48
PR_INJ4		53,38	59,69	0,177	8,63	2,75	5,20
PR5		66,96	87,85	0,261	3,05	1,63	12,04
PR_SC5	0,8	77,95	91,04	0,271	7,06	3,05	4,95
PR_INJ5		85,53	88,88	0,265	10,02	2,56	7,90
PR6		101,04	119,66	0,356	3,84	1,19	10,85
PR_SC6	1,2	110,05	124,47	0,370	3,00	2,91	7,38
PR_INJ6		104,67	131,00	0,390	6,00	2,89	6,78

Face aos resultados obtidos, conclui-se que as duas propostas de paredes (PR_SC e PR_INJ) melhoraram, em geral, o desempenho das alvenarias para ações horizontais face à situação original (PR). Realça-se o incremento do *drift* e da ductilidade das paredes melhoradas e o facto de, no final do ensaio, os danos registados

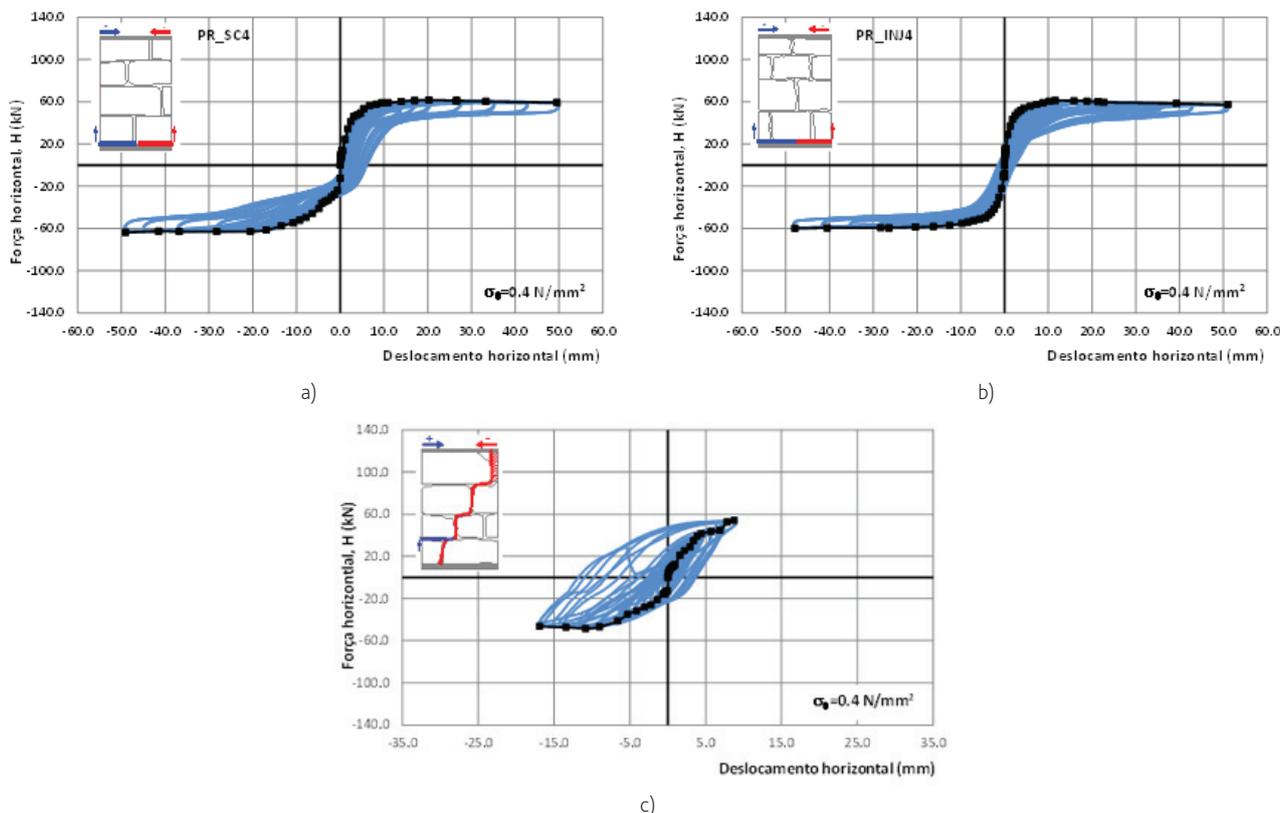


Figura 7 Diagramas histeréticos força-deslocamento ($\sigma_0 = 0,4$ MPa): a) PR_SC4, b) PR_INJ4 e c) PR4

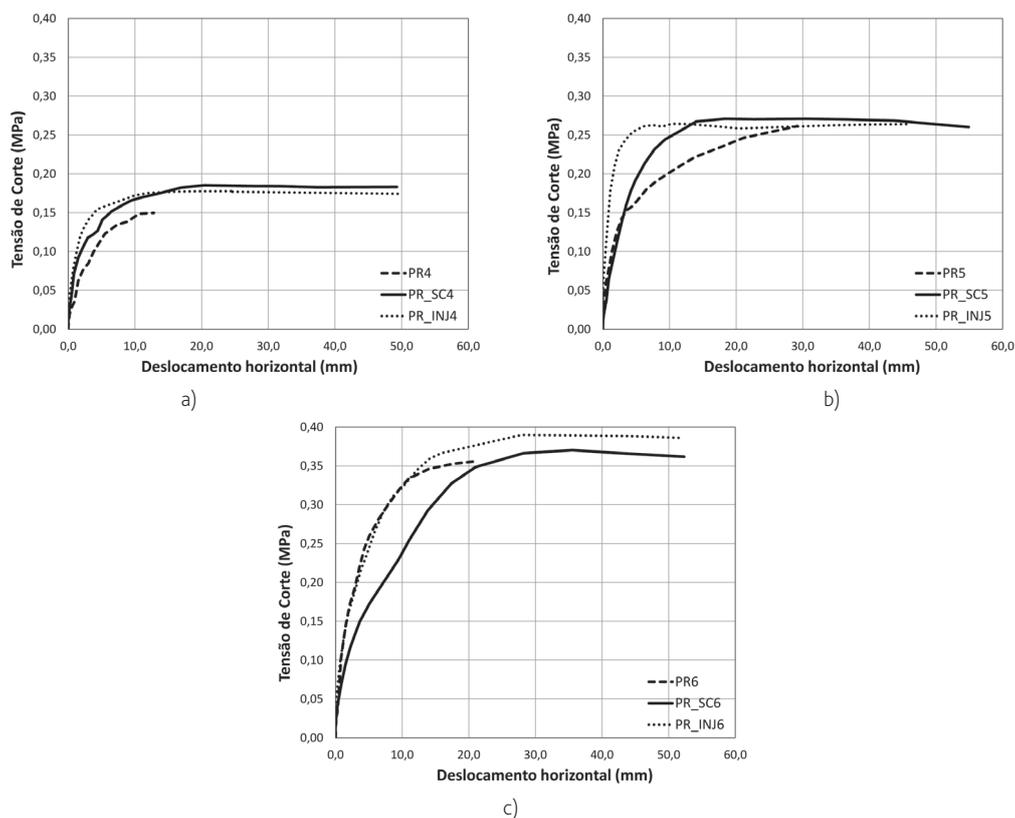


Figura 8 Curvas envolventes médias tensão de corte-desloca-mento horizontal para as paredes PR_SC, PR_INJ e PR: a) $\sigma_0 = 0,4$ MPa, b) $\sigma_0 = 0,8$ MPa e c) $\sigma_0 = 1,2$ MPa

serem muito reduzidos, concentrando-se genericamente na base das paredes, em particular quando comparados com os dos painéis PR. Os maiores incrementos ocorreram para a tensão vertical de 0,4 MPa, que corresponde ao nível de pré-compressão mais comum nos edifícios antigos. O amortecimento foi o único parâmetro que diminuiu, facto que resulta do mecanismo de dano desenvolvido nos novos painéis ser pouco dissipativo.

No entanto, embora ambas as técnicas tenham garantido genericamente um melhor comportamento da alvenaria, mais resistente e dúctil, embora menos dissipativo, no caso da proposta PR_SC é preciso garantir que as pedras possuam uma superfície de assentamento quase horizontal, de modo a evitar a colocação de calços. Para além disso, superfícies menos regulares podem induzir vazios no interior das juntas que podem causar roturas localizadas e variações no comportamento das paredes, face aos resultados encontrados neste estudo.

5 Conclusões

Com o objetivo de estudar duas propostas de melhoramento estrutural de paredes de alvenaria de granito de folha única

foram construídos dois modelos experimentais em laboratório, submetidos posteriormente a ensaios de compressão uniaxial e a ensaios de corte cíclicos no plano com compressão constante. Partindo de uma tipologia frequente em alvenarias de edifícios antigos da cidade do Porto, foram propostas duas variantes de melhoria: a primeira associada à alteração do processo construtivo para situações de reconstrução, com juntas sem calços e preenchidas com uma argamassa comercial (PR_SC); a segunda associada à injeção das juntas com uma calda comercial de uma alvenaria com características construtivas idênticas às originais (PR_INJ).

Os resultados obtidos mostraram que as duas propostas estudadas são eficazes e que induzem comportamentos similares para solicitações verticais e horizontais no plano. Deste modo, configuram-se como duas possibilidades de melhoramento estrutural de alvenarias típicas da cidade do Porto, embora com diferentes aplicabilidades: a primeira aplicável a casos de reconstrução e a segunda como opção de reforço de uma parede existente a manter. Estas duas propostas permitiram obter apreciáveis ganhos de resistência e de rigidez à compressão e, no caso do comportamento ao corte, de ductilidade e redução do dano, principalmente para os níveis de tensão vertical usualmente presentes neste tipo de estruturas.

Agradecimentos

Este trabalho foi financiado por: Financiamento Base – UIDB/04708/2020 e Financiamento programático –UIDP/04708/2020 da Unidade de Investigação CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções - financiada por fundos nacionais através da FCT/MCTES (PIDDAC). Os autores agradecem aos técnicos do Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural – LESE pelo apoio na preparação dos ensaios.

Referências

- [1] Silva, B.; Benetta, M.; da Porto, F. – (2014) – Experimental assessment of in-plane behaviour of three-leaf stone masonry walls. *Construction and Building Materials*; 53: 149-161.
- [2] Almeida, C.; Guedes, J.P.; Arêde, A.; Costa, C.Q.; Costa, A. (2011) – Physical characterization and compression tests of one leaf stone masonry walls. *Construction and Building Materials*, 30, 188-197. <https://doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.11.043>
- [3] OPCM 3274. (2005) – Primi elementi in materiali di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica, come modificato dall'OPCM 3431 del 3/5/05.
- [4] Silva, B. (2012) – Diagnosis and strengthening of historical masonry structures numerical and experimental analyses. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade de Pádua, Itália.
- [5] Valluzzi, M.R.; da Porto F.; Modena C. (2001) – Behaviour of multi-leaf stone masonry walls strengthened by different intervention techniques. III International Seminar Historical Constructions. Possibilities of Numerical and Experimental Techniques, Guimarães, Portugal.
- [6] Vintzileou, E.; Miltiadou-Fezans, A. (2007) – Mechanical properties of three-leaf stone masonry grouted with ternary or hydraulic lime-based grouts". *Engineering Structures*; vol. 30 (8); pp. 2265-2276.
- [7] Almeida, C. (2013) – Paredes de Alvenaria do Porto. Tipificação e Caracterização Experimental. Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, FEUP, Porto, Portugal.