

cnme

10º Congresso Nacional  
de Mecânica Experimental

2016

# CARACTERIZAÇÃO DE PAREDES DE PEDRA DE JUNTA SECA A AÇÕES PARA FORA DO PLANO

## CHARACTERIZATION OF DRY STONE WALLS TO OUT-OF-PLANE ACTIONS

*Lurdes Martins*

*ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho*

*Graça Vasconcelos*

*ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho*

*Javier Ortega Heras*

*ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho*

*Paulo B. Lourenço*

*ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho*

*Hugo Rodrigues*

*Departamento de Engenharia Civil, Instituto Politécnico de Leiria*

*Luís Silva*

*ISISE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho*

*Carlos Palha*

*Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho*



## RESUMO

Este artigo apresenta o trabalho experimental para a caracterização de paredes de alvenaria de pedra (granito) para ações fora do plano. A parede tem uma configuração em U e o aparelho é de junta seca. Procura-se com este ensaio identificar a capacidade resistente e de deformação, o padrão de fendilhação, os mecanismos de colapso da alvenaria de pedra.

Palavras-chave: Ensaio fora do plano / Alvenaria de pedra / Ação para fora do plano / Airbag

## ABSTRACT

This paper presents the experimental work for the characterization of the out-of-plane behavior of stone (granite) masonry walls. The wall has a U-shape and the bond in dry joint masonry. Based on test results the resistance and deformation capacity, crack pattern, collapse mechanism and hysteretic behavior are analyzed.

Key words: Out-of-plane testing / Stone masonry / Out-of-plane action / Airbag

## 1. INTRODUÇÃO

A alvenaria de pedra representa uma técnica construtiva tradicional que tem sido praticada em regiões onde existe grande disponibilidade de pedra e está presente em diversas construções históricas e vernáculas em vários países do mundo, tendo uma prevalência nos países mediterrânicos (sul da Europa).

Os edifícios de alvenaria de pedra são vulneráveis à ação sísmica, mesmo que esta seja moderada, traduzindo-se em perdas económicas e humanas significativas (Bothara e Hiçyılmaz 2008). A alvenaria de pedra irregular, associada à qualidade de mão-de-obra de baixa qualidade e recursos económicos limitados apresenta em geral baixa resistência a ações cíclicas no plano (Vasconcelos e Lourenço, 2009; Almeida, 2013). Com base em relatórios sísmicos confirma-se que o uso de materiais de construção de baixa qualidade e práticas construtivas inadequadas resultam em danos significativos nas estruturas de alvenaria (Jain et al. 2002). Para a ação sísmica, as pedras colocadas irregularmente tendem a mover-se para fora da parede e causar danos localizados ou até mesmo entrar em colapso em casos extremos (WHE 2009).

Apesar da importância do comportamento fora do plano, a investigação experimental neste domínio tem sido relativamente reduzida quando comparada com a informação disponível relativamente ao comportamento de paredes sob ações no plano. Todavia, têm vindo a ser realizados ensaios de edifícios em mesa sísmica através dos quais é possível avaliar o comportamento sísmico global e avaliar a vulnerabilidade dos elementos a ações para fora do plano (Tomazevic *et al.* 1991; Mouzakis *et al.* 2012; Doherty *et al.* 2002; Bothara *et al.* 2010, Juhasova *et al.* 2007; Griffith *et al.* 2007; Magenes *et al.* 2010). No domínio do comportamento experimental de paredes de pedra parede sujeitos a ações estáticas para fora do plano salienta-se a investigação levada a cabo por Costa *et al.* (2013) Costa *et al.* (2014) e Ferreira (2015).

Neste trabalho apresenta-se e discute-se parte dos resultados de uma campanha de ensaios de caracterização do comportamento para fora do plano de alvenaria de pedra irregular de pano duplo, característica da arquitetura vernácula em Portugal.

## 2. DESCRIÇÃO DOS ENSAIOS EXPERIMENTAIS PARA FORA DO PLANO

O presente artigo analisa o comportamento para fora do plano de paredes de alvenaria de pano duplo e de aparelho irregular de junta seca, característica da arquitetura vernácula da região Norte de Portugal. Para o efeito, foi definida uma campanha experimental em

paredes de alvenaria com configuração em U sujeita a ações fora do plano. Neste artigo apresenta-se e discute-se os resultados experimentais obtidos no primeiro ensaio realizado.

## 2.1 Construção e caracterização geométrica da parede

A alvenaria de pedra pode apresentar uma grande variedade de aparelhos relativos à organização das pedras em alçado, classificando-se em geral em paredes de alvenaria regular, irregular e muito irregular (Almeida, 2013). A dificuldade em trabalhar a pedra como o granito e a limitação de recursos económicos leva a que na arquitetura vernácula se utilize pedras de forma mais irregular, onde os gastos com mão-de-obra para definir a forma final das pedras são reduzidos. Em termos de secção transversal, apesar de ser possível encontrar paredes de alvenaria de pedra de pano simples, é mais comum ter paredes de alvenaria de pedra de dois ou três panos. No caso de paredes de dois panos, é frequente que a ligação entre os panos seja deficiente, quer por causa de uma reduzida sobreposição de pedras na espessura, quer devido à ausência de pedras travadoras. Na arquitetura vernácula, o assentamento das pedras poderá ser feito através de argamassas à base de cal, argamassas de terra. No caso de paredes de junta seca, não é utilizado qualquer tipo de argamassa, havendo contacto direto entre as superfícies das pedras. Quando esta é irregular, utiliza-se pequenas pedras que servem de calços para estabilizar as pedras.

Na sequência de um levantamento efetuado no vale do rio Tua de construções da arquitetura vernácula (Martins et al., 2013), decidiu-se efetuar a caracterização experimental de paredes de alvenaria de fachada de granito representativas de grande número de construções tradicionais na zona norte e dentro de Portugal. Numa primeira fase, pretende-se avaliar o comportamento de fachadas a ações perpendiculares ao plano, dado que estas apresentam uma maior vulnerabilidade a este tipo de ação induzida por exemplo por sismos. Na Figura 1 apresenta-se a geometria e a configuração da parede definida para a campanha experimental. Dado que se pretende simular o comportamento de uma fachada para fora do plano, decidiu-se considerar as paredes transversais para representar as ligações das fachadas às paredes perpendiculares, sendo por isso adotada a forma de U. A parede a ensaiar é de pano duplo e o aparelho da alvenaria em alçado é irregular sem argamassa de ligação entre as pedras, podendo considerar-se a alvenaria irregular de junta seca. As dimensões da parede para ensaio foram definidas com base numa parede de um edifício protótipo em que as fachadas têm em média 4.5m de comprimento, 2.6m de altura e 0.6m de espessura. A relação entre a altura e comprimento da parede frontal é de 0.6. O modelo experimental foi definido com redução das dimensões reais da parede para metade, assumindo a realização dos ensaios em paredes à escala reduzida de 1 para 2, ver Figura

1a. As paredes transversais têm um comprimento de 0.7m a partir da parede frontal, tendo em conta que a rotura do conjunto não deverá envolver o destacamento da fachada em relação às paredes transversais ao linhas de rotura a 45°.

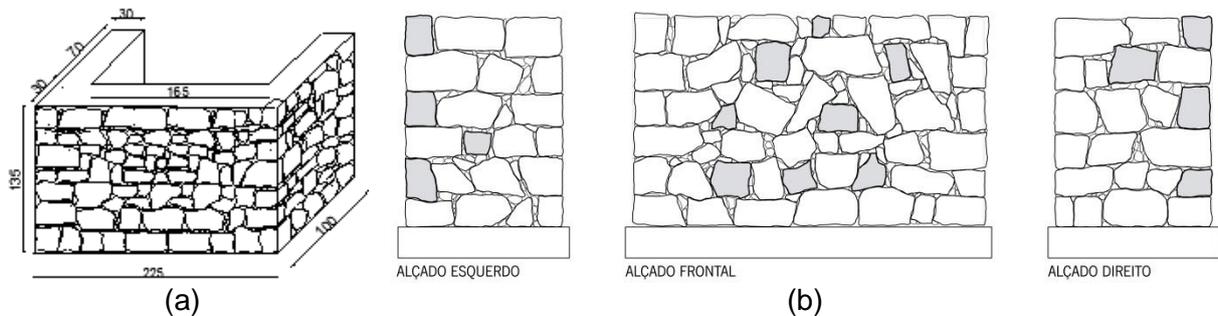
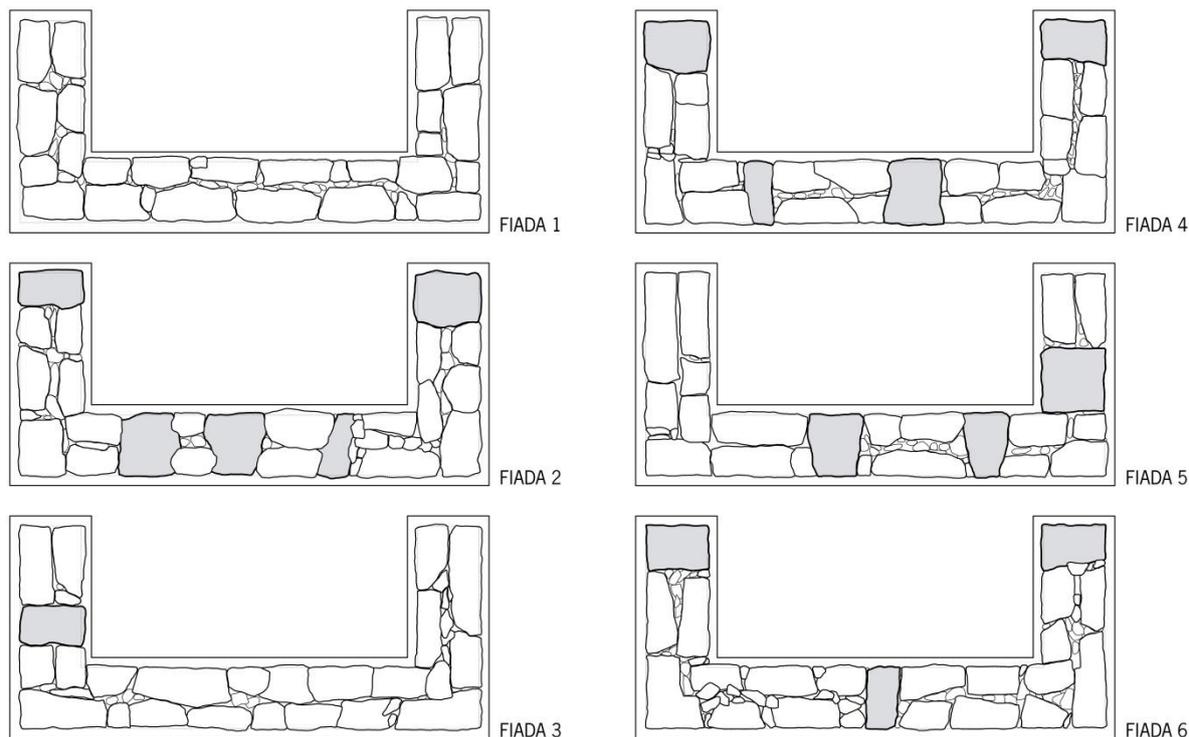


Fig. 1 – Configuração da parede: (a) geometria da parede (cm); (b) alçados

Assumindo que a capacidade resistente para fora do plano das paredes de alvenaria é altamente dependente da sua morfologia e da técnica de assentamento da pedra, foi tida em consideração a adequada ligação dos panos da parede através da colocação de pedras travadoras cuja comprimento é igual à espessura da parede. A distribuição das pedras travadoras em cada nível de assentamento indica-se na Figura 2. De acordo com Swain (1972) para se ligar a parede transversal, deve haver um número considerável de pedras travadoras que se prolongam a partir da frente para trás nas paredes finas e a partir do exterior para o interior nas paredes espessas. Este autor sugere uma percentagem de pedras travadoras não inferior a 20% da área da parede. Através da análise da Figura 2, verifica-se ainda que a ligação da parede frontal às paredes transversais é melhor na parede transversal esquerda, uma vez que foi possível colocar pedras com comprimento superior à espessura da parede de forma alternada entre níveis de assentamento. No cunhal direito, o travamento não é tão efetivo, dado que não existe pedra travadoras com comprimento suficiente que permitam uma boa ligação entre a parede frontal e a parede transversal esquerda. Esta falta de travamento é particularmente visível nas fiadas 1, 4 e 5, ver Figura 2. Neste caso o assentamento das pedras define uma junta aproximadamente vertical próxima ao canto da parede (ligação fraca), visível também no alçado direito da parede transversal (Figura 1b). A **Error! Reference source not found.** resume o número e percentagem de pedras travadoras no provete de alvenaria, bem como a distância vertical e horizontal entre as pedras travadoras. A partir da análise dos valores apresentados na **Error! Reference source not found.** constata-se que a parede (frontal e transversais) apresenta uma percentagem de pedras travadoras inferior a 20% que é o valor mínimo recomendado por Swain (1972). A Fig. 3 apresenta algumas fases da construção da parede e o aspeto final da paredes de alvenaria de pedra de junta seca.



**Fig. 2 – Levantamento geométrico das várias fiadas da parede**

**Tabela 1 – Caracterização da parede de acordo com as pedras travadoras**

Parede	Nº travadores	Distância horizontal (m)	Distância vertical (m)	Área travadores (m <sup>2</sup> )	Percentagem travadores (%)	Distância entre a fundação e o 1º travador (m)
Frontal	8	0.45	0.42	0.324	14%	0.28+0.20
Transversal direita	4	0	0.42	0.190	13.8%	0.28+0.20
Transversal esquerda	4	0	0.42	0.184	13.6%	0.28+0.20

A construção da parede foi feita por um pedreiro, utilizando blocos de pedra de granito provenientes de uma pedreira localizada no Norte de Portugal. As paredes foram construídas sobre uma viga de fundação em betão armado com 20cm de espessura. O topo superior das paredes foi regularizado com uma argamassa de cal com 2cm de espessura.

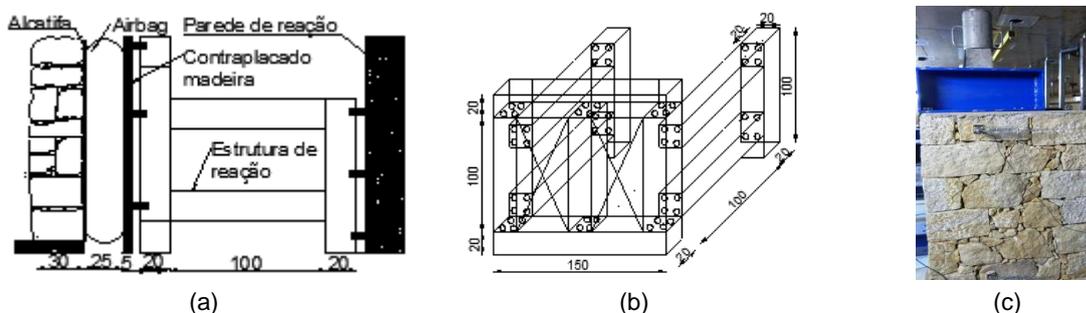


**Fig. 3 – Fases de construção e aspeto final da parede de alvenaria de pedra**

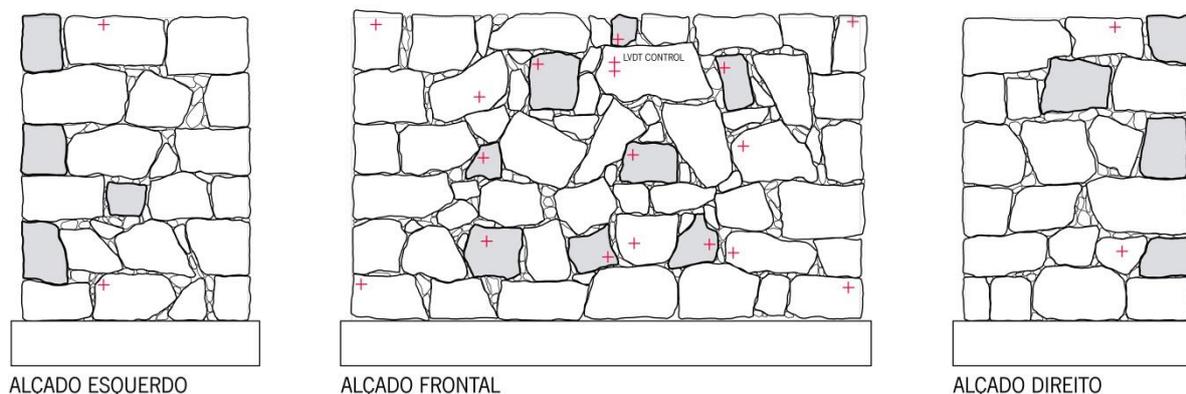
## 2.2 Esquema de ensaio e instrumentação

O ensaio para fora do plano realizado na parede frontal foi efetuado considerando uma distribuição de carga aproximadamente uniforme na superfície da parede. Para este feito foi aplicado na superfície anterior da parede frontal um airbag de nylon com uma área de 150cm de largura por 140cm de altura, ver Fig.4a. Entre o airbag e a parede de reação do laboratório, foi colocada uma estrutura constituída por um conjunto de perfis HEB200 aparafusados. A parte frontal da estrutura foi reforçada com tirantes metálicos para aumentar a rigidez e possibilitar a ligação de uma lâmina de contraplacado protetor de madeira com 5cm de espessura para servir de base ao airbag, ver Fig.4b. A estrutura de aço está posteriormente ligada à parede de reação do laboratório através de pernos metálicos. Com o objetivo de medir a força aplicada pelo airbag à parede de alvenaria, foram colocadas 4 células de carga entre os perfis metálicos verticais e a parede de reação no alinhamento dos perfis horizontais, ver Fig. 4b.

No topo superior de cada parede transversal foi colocado um perfil metálico HEB300 para a aplicação uniforme da carga vertical (Fig. 4c), que foi aplicada através de um atuador colocado entre o perfil metálico e a laje de reação. Desta forma, para reproduzir uma carga vertical decorrente do peso próprio da cobertura de uma casa tradicional (telhado com ripado em madeira coberto com colmo ou telhas de barro em canudo) foi aplicada uma carga vertical nas paredes transversais de 10KN, correspondente a uma tensão de aproximadamente 0.05MPa. O controlo do ensaio foi efetuado com base no deslocamento medido na proximidade do topo da parede a meio vão (Fig 5). A escolha deste deslocamento foi efetuada com base na hipótese deste ponto apresentar o valor máximo de deslocamento. Os deslocamentos da parede foram registados através de 22 transdutores de deslocamento (LVDT) colocados em diferentes pedras da parede frontal para definir de forma aproximada a deformação da parede (**Error! Reference source not found.**).



**Fig. 4 – Configuração do ensaio para fora do plano (dimensões em cm): (a) esquema do ensaio em perfil; (b) estrutura com perfis metálicos HEB200; (c) aplicação da carga vertical nas paredes transversais**



**Fig. 5 – Posicionamento dos LVDTs: (a) parede transversal esquerda (2 LVDTs); (b) parede frontal (18 LVDTs); (c) parede transversal direita (2 LVDTs)**

Neste posicionamento houve o cuidado de definir na medida do possível 3 alinhamentos verticais e três níveis horizontais perfazendo no total 9 pontos, tendo em atenção a monitorização das paredes travadoras com o objetivo de medir deslocamento globais da parede e não apenas possíveis deslocamentos do pano exterior. Adicionalmente, foram medidos os deslocamentos na base e topo da parede frontal no alinhamento das paredes transversais para monitorizar possíveis destacamentos da parede frontal. Os LVDTs foram fixados a perfis tubulares colocados entre os pavimentos do laboratório, ver Fig. 6.



**Fig. 6 – Setup do ensaio e posicionamento dos LVDTs**

A lei de carregamento foi definida através da definição de uma lei de deslocamento no transdutor de deslocamento de controlo de acordo com o diagrama indicado na Fig. 7. Neste sentido, foram aplicados três ciclos iniciais de 3.5mm para analisar o comportamento linear elástico e posteriormente foram definidos ciclos de carregamento com incrementos de 1.4 relativamente ao valor do carregamento anterior. O deslocamento horizontal máximo aplicado foi de 70mm (Fig. 7). A execução do ensaio para fora do plano foi feita através de um software LabView, que controla a pressão e a descompressão do airbag em função da

lei de deslocamentos no LVDT de controlo. O nível de pressão do airbag foi monitorizado através de sensores de pressão.

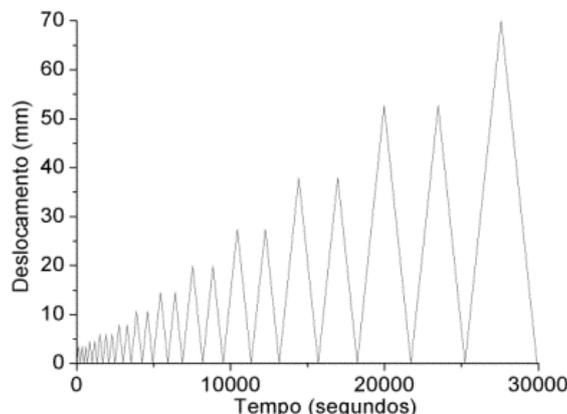


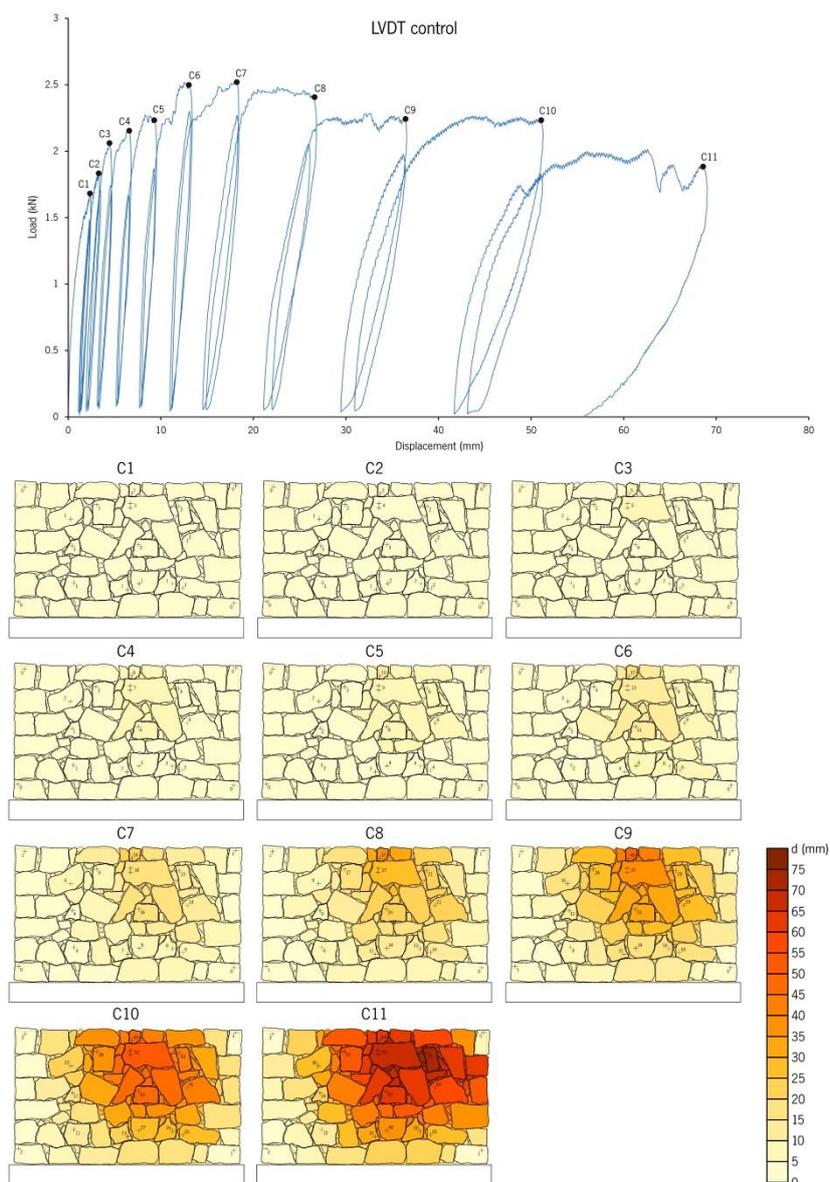
Fig. 7 – Lei de carregamento

### 3. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DE RESULTADOS

A análise de resultados obtidos no ensaio de caracterização do comportamento da parede para ações fora do plano é feita com base no diagrama força-deslocamento, na deformação e no padrão de dano registado.

O diagrama força-deslocamento apresentado na **Error! Reference source not found.** demonstra que a parede apresenta uma resistência relativamente reduzida mas uma capacidade de deformação razoável (aproximadamente 70mm). Devido à deformação considerável da parede e abertura do cunhal direito, decidiu-se terminar o ensaio para este nível de deslocamento. O drift lateral correspondente a este deslocamento é de aproximadamente 5.1%. O drift correspondente ao regime elástico foi de 0.6% em regime elástico (até ao aparecimento da primeira fenda). A parede apresenta deformações plásticas crescentes, uma vez que apenas uma pequena percentagem de deformação é recuperada durante a descarga. Este padrão de deformação indica que o deslocamento da parede se desenvolve por deslizamento das pedras, que cresce sucessivamente, e que se deve à ausência de argamassa na ligação das pedras. Este fator justifica também uma acentuada não linearidade no regime de pré-pico até à força máxima de 2.5kN. Verifica-se ainda que a parede apresenta uma degradação de rigidez desde o início do carregamento, sendo mais evidente após a carga máxima, o que deverá estar relacionada com o maior nível de dano que se desenvolve na parede, como se mostra na Fig. 8. A reduzida resistência da parede para ações fora do plano demonstra a sua vulnerabilidade para este tipo de ação. Para além da parede ser de junta seca, e por isso se esperar valores reduzidos de resistência, verifica-se que não existe sobreposição das pedras de cada um dos panos da parede, sendo a

ligação entre ambos feita através das pedras travadoras. Adicionalmente, verifica-se que o deficiente travamento no cunhal direito acaba por condicionar a deformação da parede, como se pode verificar através da evolução sequencial da deformação da parede apresentada na Fig. 8. De facto, a deformação da parede é condicionada pelas condições de fronteira (bordo livre superior) e pelas ligações às paredes transversais (ligação direita deficiente).



**Fig. 8 – Diagrama força-deslocamento e evolução da deformação da parede**

Os perfis de deslocamento obtidos em diferentes alinhamentos verticais apresentam-se na

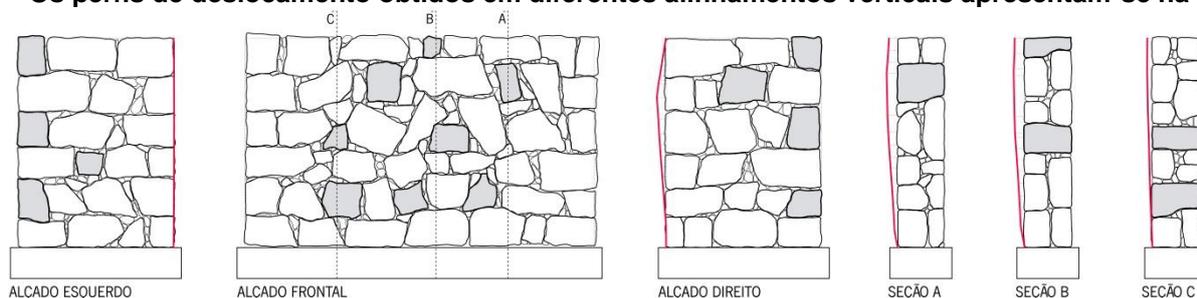
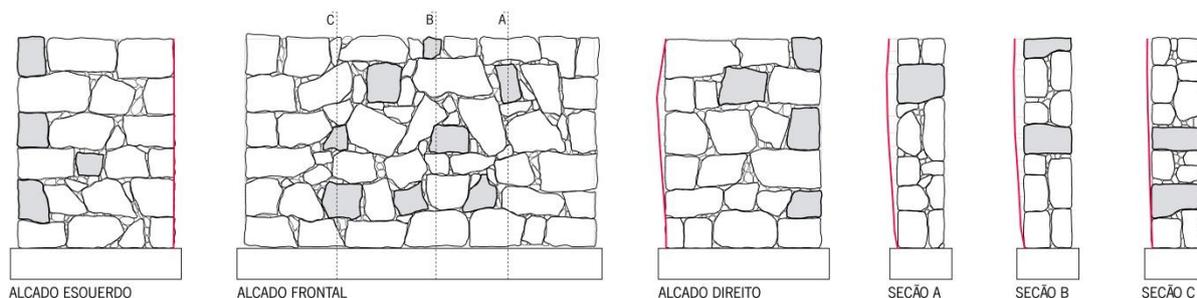


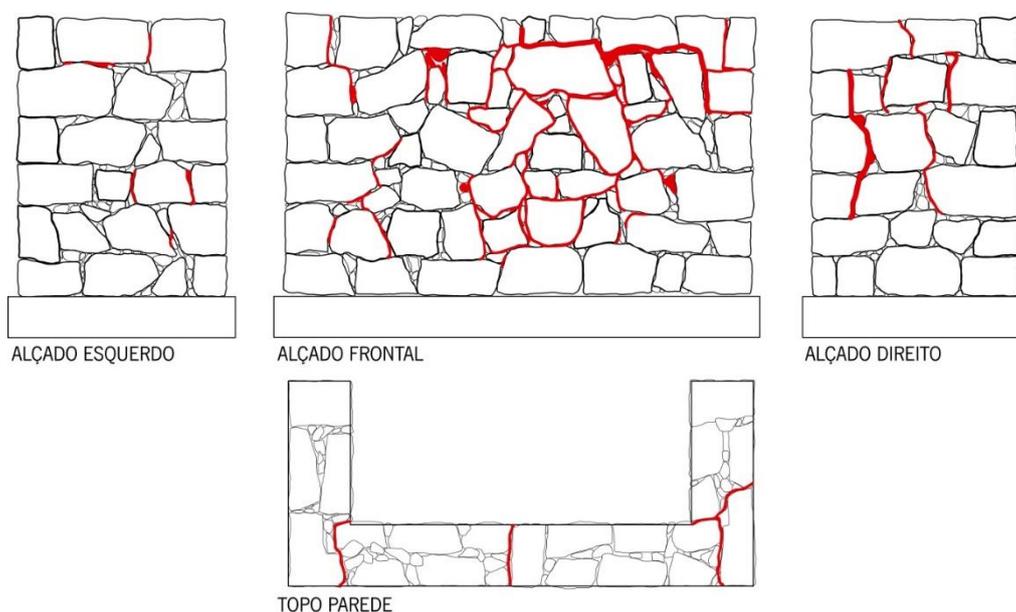
Fig. 9. Dos resultados experimentais obtidos, verificou-se que a parede se deformou de modo ligeiramente assimétrico para deslocamentos impostos pequenos, mas a assimetria aumentou para deslocamentos impostos crescentes. Esta deformação foi condicionada pela ligação da parede frontal às paredes transversais. O maior deslocamento da parede para fora do plano (aproximadamente 70mm) ocorreu a meio vão e no canto direito da parede, como resultado travamento do cunhal ser deficiente. O destacamento da prede frontal relativamente à parede transversal direita observa-se também pelo perfil de deslocamentos medido na direção da parede transversal. Confirma-se que a parede esquerda praticamente não apresentou deslocamentos horizontais, ao contrário da parede transversal esquerda que apresenta deslocamentos originados pelo desligamento com a parede frontal.



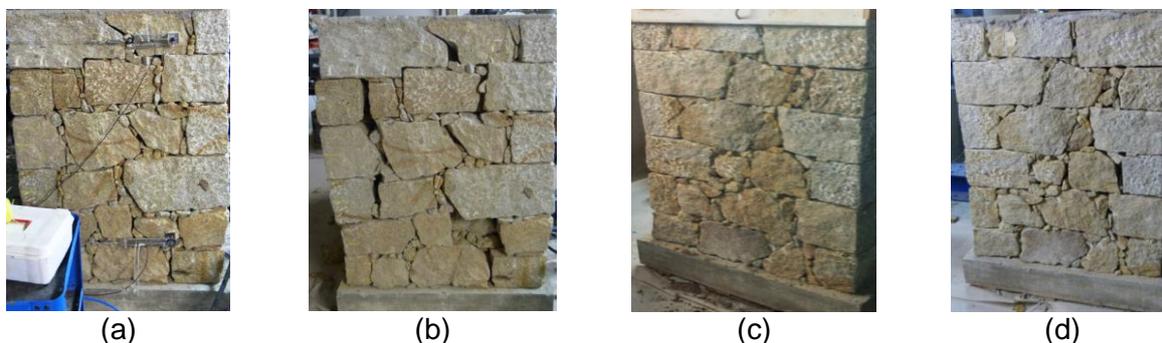
**Fig. 9 – Perfis de deslocamento em altura fora do plano na parede frontal e das paredes laterais**

Em termos gerais, a parede frontal apresenta um padrão de fendilhação típico de um comportamento governado pelo movimento para fora do plano (**Error! Reference source not found.**). Foi observada a abertura de três fendas verticais ao longo das juntas das pedras: (1) no topo superior a meio vão da parede ao longo da pedra travadora; (2) na zona dos cunhais na interseção da parede frontal com as paredes transversais (**Error! Reference source not found.**). Estas fendas verticais são seguidas pela abertura de uma fenda horizontal a partir da qual o deslocamento entre as juntas das pedras é mais pronunciado. O maior dano da parede situa-se na metade direita da mesma, devido à ligação deficiente com a parede ortogonal correspondente. Verificou-se também o desprendimento de pequenos fragmentos de pedra com função de calçamento e de

preenchimentos das juntas, e algumas pedras do pano exterior acabaram por cair criando vazios na parede na fase final do ensaio. Nas paredes transversais foi observado um maior dano na parede lateral direita (Fig. 11), em correspondência com a maior deformação registada. Esta parede apresenta três fendas verticais acentuadas e conseqüentemente fendas horizontais ao longo da interface das pedras. Estas fendas justificam-se pela ligação deficiente com a parede frontal, com um alinhamento vertical das juntas das pedras, sem interrupção (Fig. 11), promovendo o destacamento do cunhal como se pode observar na Fig. 11,c. Na parede transversal esquerda (Fig. 11c,d) o dano é pouco visível, sendo apenas observadas duas pequenas fendas verticais (Fig. 11d), o que resulta da boa ligação entre as paredes frontal e transversal esquerda.



**Fig. 10 – Padrão de fendilhação na parede**



**Fig. 11 – (a) Parede lateral direita antes do ensaio; (b) padrão de fendilhação após o ensaio fora do plano; (c) parede lateral esquerda antes do ensaio; (d) padrão de fendilhação após o ensaio fora do plano**

#### 4. CONCLUSÕES

Com o trabalho apresentado pretendeu-se fazer uma apresentação dos resultados experimentais obtidos numa parede de alvenaria de pedra de pano duplo, característica na arquitetura vernácula, sujeita a ações para fora do plano. A parede de alvenaria de granito de junta seca foi ensaiada em escala reduzida em controlo de deslocamento, através da aplicação de um airbag de modo a simular de forma mais eficiente a ação sísmica perpendicular ao plano das paredes.

Com base nos resultados experimentais foi possível obter o diagrama força-deslocamento, o padrão de deformação e padrão de dano da parede. Concluiu-se que a resistência obtida é relativamente reduzida, o que demonstra a vulnerabilidade deste tipo de construção. Todavia, a resistência máxima foi obtida para um dano controlado, sendo possível explorar a capacidade de deformação da parede após a resistência máxima. As deformações plásticas elevadas registadas resultam do aparelho irregular da alvenaria e pela ausência de argamassa nas juntas, o que promove deslizamentos crescentes entre as pedras. A ligação entre a parede frontal e as paredes transversais revelou ser determinante no padrão de dano observado, condicionando quer o campo de deslocamento observado na parede, quer como o padrão de fendilhação.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Almeida, C. 2013. Stone masonry walls from Porto: Typology and experimental characterization, Tese de Doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Bothara, J. K., Dhakal, R. P. e Mander, J. B. 2010. Seismic performance of an unreinforced masonry building: an experimental investigation. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 39(1): p. 45-68.
- Costa, A. A., Arêde, A., Campos Costa, A., Penna, A. e Costa, A. 2013b. Out-of-plane behaviour of a full scale stone masonry façade. Part 2: shaking table tests. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*.
- Costa, A. A., Arêde, A., Costa, A., Ferreira, T., Gomes, A. e Varum, H. 2014. Experimental study of the out-of-plane behaviour of unreinforced sacco stone masonry walls: Comparative analysis of two different test setups. 9th International Masonry Conference. Guimarães.
- Doherty, K., Griffith, M., Lam, N. e Wilson, J. 2002. Displacement based analysis for out-of-plane bending of seismically loaded unreinforced masonry walls. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 31(4): p. 833-850.
- Ferreira, T. 2015. Out-of-plane seismic performance of stone masonry walls: experimental and analytical assessment. Aveiro: Civil Engineering department, University of Aveiro.
- Griffith, M., Vaculik, J., Lam, N., Wilson, J. e Lumantarna, E. 2007. Cyclic testing of unreinforced masonry walls in two-way bending. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36(6): p. 801-821.
- Jain, S. K., Lettis, W. R., Murty, C. V. e Bardet, J. 2002. Bhuj, India Earthquake of January 26, 2001. Reconnaissance Report, *Earthquake Spectra*, Vol. 18, Supplement A.
- Juhásová, E., Sofronie, R. e Bairrão, R. 2007. Stone masonry in historical buildings—ways to increase their resistance and durability. *Engineering Structures*, 30(8): p. 2194-2205.

- Magenes, G., Penna, A. e Galasco, A. 2010) A full-scale shaking table test on a two-storey stone masonry building. 14th European Conference on Earthquake Engineering. Ohrid, Macedonia.
- Martins, L., Vasconcelos, G., Lourenço, P.B. Architectural heritage of the north eastern Portugal: History, construction and valorisation, Conferência Internacional de Património Vernáculo e Arquitetura de Terra CIAV 2013, October 16-18, Vila Nova de Cerveira, 2013.
- Mouzakis, C., Vintzileou, E., Adami, C.-E. e Karapitta, L. 2012. Dynamic tests on three leaf stone masonry building model before and after interventions. Proceedings of the 8th international conference on structural analysis of historical construction. Wrocław.
- Swain, G. 1972. Structural engineering: Stresses, graphical statics and masonry, vol. 3. McGraw-Hill.
- Tomazevic, M., Weiss, P. e Velechovsky, T. 1991. The influence of rigidity of floors on the seismic behaviour of old stone-masonry buildings. vol.5, n.3.
- Vasconcelos, G., Lourenço, P.B., In-plane experimental behaviour of stone masonry walls under cyclic loading, Journal of Structural Engineering (ASCE), 135(10): 1269-1277, 2009.
- WHE. 2009. World Housing Encyclopedia: An Encyclopedia of Housing Construction in Seismically Active Areas of the World. Obtido em 24 de Julho de 2015, de [www.world-housing.net](http://www.world-housing.net).