

# AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DE UM SISTEMA CONSTRUTIVO DE PAREDES DE ENCHIMENTO EM ALVENARIA PARA RESISTIR À AÇÃO SÍSMICA

## EXPERIMENTAL VALIDATION OF A CONSTRUCTIVE SYSTEM FOR EARTHQUAKE RESISTANCE OF MASONRY INFILL WALLS

*Luís M. Silva*

*Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho*

*Graça Vasconcelos*

*Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho*

*Paulo B. Lourenço*

*Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho*



### RESUMO

Este artigo, apresenta o trabalho experimental desenvolvido na Universidade do Minho para a validação de uma solução de paredes de enchimento de alvenaria em edifícios de betão armado. É apresentado o processo de validação experimental baseado em ensaios cíclicos no plano e fora do plano, onde se verifica a influência da presença da parede de enchimento no comportamento global do sistema. Estes ensaios foram realizados em provetes de escala reduzida (1:1,5). Todos os ensaios foram realizados em controlo de deslocamento, utilizando um padrão de carregamento definido com base nas recomendações da FEMA 461.

### ABSTRACT

This article, presents the experimental work carried out at the University of Minho for the validation of constructive system of masonry infill walls in reinforced concrete buildings. It is showed the experimental validation process, based on cyclic tests for in-plane and out-of-

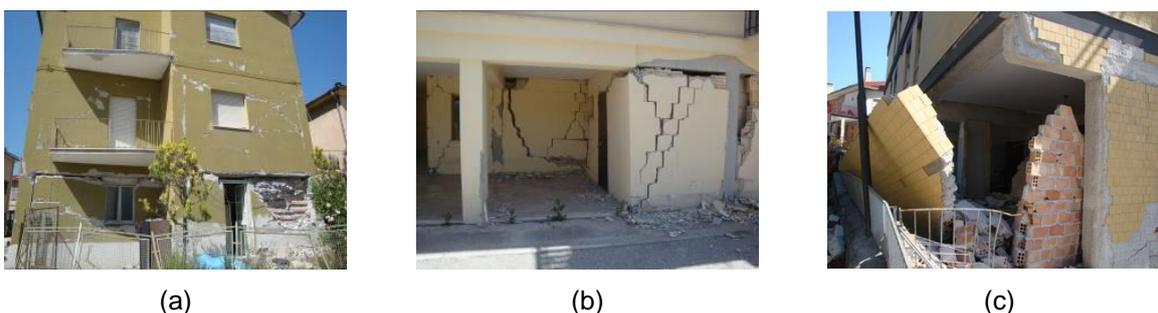
plane directions, where it evaluates the influence of the masonry infill wall on the overall system behaviour. These experimental tests were performed in reduced scale specimens (1:1.5). All tests were performed in displacement control using a load pattern based on the FEMA 461 recommendations.

Palavras-chave: Sistemas inovadores / Paredes de enchimento / Comportamento sísmico / Validação Experimental / Ensaio cíclicos / Tijolo térmico

## 1. INTRODUÇÃO

Desde a década de 50 do século passado que vários autores têm vindo a realizar estudos, (Jorquera, 1964) (Fiorato et al., 1970), para avaliar a influência das paredes de enchimento na estrutura de betão armado dos edifícios, tentando perceber qual a sua contribuição para a resistência e rigidez lateral dos edifícios, no caso destes serem sujeitos a uma ação horizontal.

Os recentes sismos em Lefkada em 2003, (Karakostas et al., 2005), L'Aquila em 2009, (Braga et al., 2011) e Emilia Romagna em 2012, (Magenes et al., 2012), permitiram observar que as atuais estruturas de betão armado, apresentam uma razoável capacidade de suportar ações sísmicas, mas evidenciaram o fraco comportamento dos elementos considerados não estruturais, onde se incluem as paredes de enchimento em alvenaria, (Lourenço et al., 2010). Este tipo de paredes, quando sujeita à ação sísmica, assumem um comportamento estrutural para o qual não foram dimensionadas, fazendo surgir diversas patologias, sendo as mais comuns, a separação entre o painel de alvenaria e os elementos estruturais, as fendas diagonais, e o colapso total ou parcial do pano de parede para fora do plano (ver Figura 1). Este tipo de danos pode colocar em risco a vida humana, e está associado a elevadas perdas económicas, (Al-Chaar et al., 2002) (Bertero et al., 1983), como aconteceu no sismo de Loma Prieta em 1989 e em Northridge em 1994, onde os custos associados aos danos em elementos não estruturais atingiram os 30 milhões de dólares americanos, (Vicente et al., 2010).



**Figura 1 - Exemplo de patologias verificadas no sismo de L'Aquila, (a) separação do pano da estrutura, (b) fendilhação diagonal, (c) colapso para fora do plano.**

As paredes de enchimento, como são consideradas não estruturais, não passam por nenhum processo de projeto e verificação para as ações sísmicas. O eurocódigo 8, (CEN EN 1998-1, 2004), é omissivo neste caso, sendo apenas apresentado um procedimento simplificado para o cálculo da ação sísmica para fora do plano. No entanto não fornece

nenhuma recomendação para o projeto deste tipo de paredes. Por outro lado, este código, considera que a verificação de segurança de elementos não estruturais, está garantida se o deslocamento relativo entre pisos for limitado. Contudo afirma que devem ser adotadas medidas apropriadas para evitar o colapso frágil e a desintegração prematura das paredes de enchimento.

Tendo em conta a situação apresentada, é possível concluir que é necessário continuar a investigação na área das paredes de enchimento em alvenaria, pois estas são uma solução frequentemente usada em muitos países do Sul e Centro da Europa, sobretudo em edifícios de betão armado, levando à produção de milhares de unidades de alvenaria todos os anos, (Pompeu dos Santos, 2007). A utilização adequada deste tipo de paredes, poderá contribuir para melhorar significativamente a performance dos edifícios em termos de qualidade interior, tendo ainda uma influência positiva na resistência lateral do edifício, na sua rigidez e energia de dissipação, (Vintzileou et al., 1989). Assim o projeto europeu INSYSME (606229), tem como principal objetivo o desenvolvimento de novos sistemas para paredes de enchimento em alvenaria que resistam melhor à ação sísmica, combinando simplicidade com baixo custo, e ainda propor recomendações e procedimentos de cálculo para o projeto deste tipo de paredes, tentando assim preencher um vazio nos códigos de projeto atuais. Estas soluções são projetadas para serem utilizadas nas novas construções, usando materiais tradicionais.

Neste artigo apresenta-se uma solução construtiva para paredes de enchimento em alvenaria, proposta pela Universidade do Minho no âmbito do projeto INSYSME, faz-se uma descrição do sistema e apresenta-se a validação experimental no plano e para fora do plano.

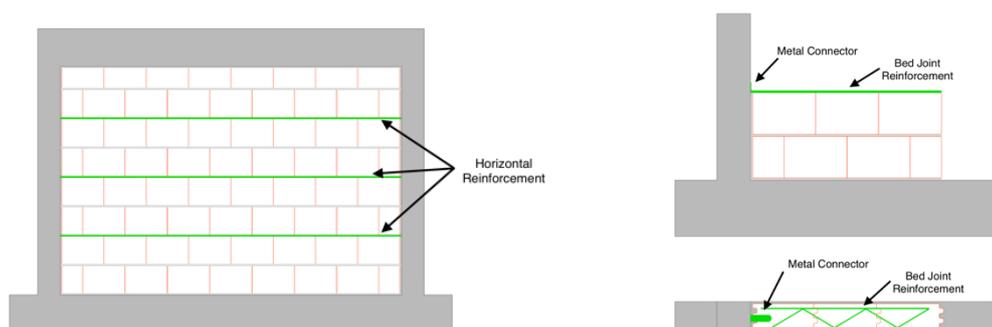
## **2. SISTEMA DESENVOLVIDO NA UNIVERSIDADE DO MINHO**

Na sequência do mau comportamento sísmico evidenciado pelas paredes de enchimento utilizadas atualmente, existe uma clara necessidade de propor e desenvolver sistemas que apresentem um comportamento sísmico melhorado. Neste âmbito o projeto de investigação INSYSME, procurou responder a este desafio, tendo identificado três tipos de conceitos para o desenvolvimento de sistemas de paredes de alvenaria de enchimento.

- Manter a parede rigidamente ligada à estrutura de betão armado, utilizando unidades robustas e reforços internos (armadura de junta) ou externos (reboco armado).

- Manter a parede rigidamente ligada à estrutura de betão armado, ou ligeiramente desligada, mas permitindo deformações internas na parede, utilizando para tal, dispositivos especiais, unidades especiais, que permitam o deslizamento ao longo das juntas horizontais ou verticais.
- Desligar a parede da estrutura de betão armado ao longo da viga superior, e/ou dos pilares, de modo a permitir os deslocamentos relativos entre a parede e a estrutura de betão armado, sem que ocorram interações.

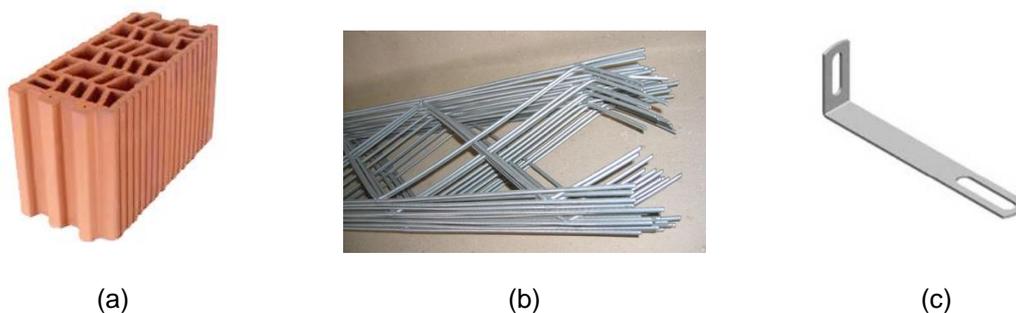
Como base no exposto anteriormente, a Universidade do Minho desenvolveu um sistema (Sistema Térmico), para fazer face aos desafios propostos. O sistema utiliza materiais comerciais, pelo que a inovação neste caso advém da junção dos vários componentes num só sistema. O sistema térmico (ver Figura 2), é um sistema de parede simples, que mantém a parede rigidamente ligada à estrutura de betão armado.



**Figura 2 - Proposta do sistema Térmico, visão geral (esquerda), detalhes do sistema (direita).**

A unidade de alvenaria utilizada (ver Figura 3a), possui furação vertical, apresentando características térmicas e acústicas melhoradas. A argamassa é do tipo M10, pré doseada à qual é apenas necessário juntar água. Este sistema apenas utiliza argamassa nas juntas horizontais e nas interfaces entre a parede e a estrutura de betão armado. As juntas verticais são realizadas utilizando o encaixe existente nas unidades de alvenaria. De duas em duas fiadas, foi utilizado um reforço metálico (ver Figura 3b) ao nível das juntas horizontais e um conector metálico que liga a parede ao pórtico de betão armado (ver Figura 3c). A ideia base deste sistema foi aumentar a capacidade de carga que o sistema consegue suportar, para isso, optou-se por fixar a parede à estrutura de betão armado através dos conectores metálicos e utilizar o reforço ao nível das juntas horizontais. Espera-se que estas alterações combinadas com a unidade de alvenaria robusta, promovam um aumento da rigidez do sistema, e tornem o sistema capaz de suportar cargas elevadas,

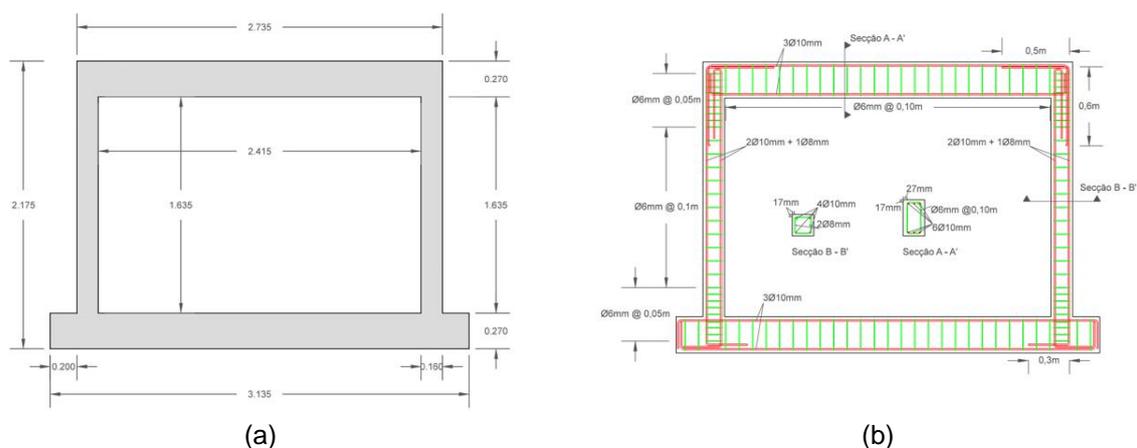
quando são introduzidas forças no plano, permitindo assim reduzir alguns dos danos causados por este tipo de ações. No caso do comportamento fora do plano, a existência de conectores entre a parede e os pilares, e o reforço nas juntas horizontais, melhora o desempenho, reduzindo a possibilidade de colapso para fora do plano.



**Figura 3 - Componentes utilizados no sistema Térmico, (a) unidade de alvenaria, (b) armaduras de junta, (c) conector metálico.**

### 3. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA

A definição das dimensões do pórtico tipo para utilizar neste estudo, foi feita utilizando um trabalho extensivo de recolha de dados de edifícios do parque imobiliário português, a partir de diferentes cidades em Portugal, realizado por Furtado et al (2015). Devido às limitações do laboratório da universidade do Minho, foi decidido testar paredes em escala reduzida (1: 1,5), (ver Figura 4 (a)). Para isso, foi utilizada a Lei de semelhanças de Cauchy. O esquema de reforço e geometria adotada para o pórtico de betão armado estão apresentados na Figura 4 (b).



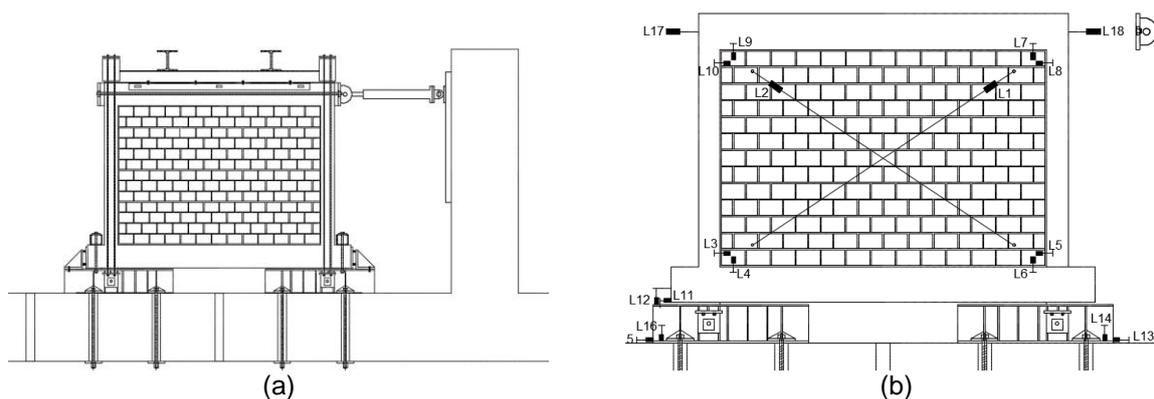
**Figura 4 - Esquema do pórtico ensaiado, (a) esquema geométrico, (b) esquema de armaduras.**

O aço utilizado para a construção do pórtico de betão armado é da classe A400NR, no caso do betão, foi utilizado um betão da classe C55/67, para a construção dos pórticos.

O esquema de ensaio utilizado para os ensaios no plano, encontra-se indicado na Figura 5(a). O pórtico com a parede de alvenaria é fixo a uma laje de reação por meios mecânicos, de modo a evitar o seu deslizamento e qualquer outro movimento. O movimento para fora do plano no topo do pórtico é restringido pela colocação de um perfil em L, de cada um dos lados da viga superior do pórtico. Cada um dos perfis em L, possui 3 rolamentos, para minimizar, ou mesmo eliminar a fricção entre os perfis em L e a viga superior do pórtico, durante o ensaio no plano.

No topo de cada um dos pilares do pórtico é montado um atuador hidráulico, que irá aplicar uma força de 200kN, correspondente a 30% da capacidade axial dos pilares. Estes atuadores hidráulicos estão conectados à parte inferior do pórtico, por 4 varões de aço de 16mm, com ligações rotuladas para permitir acompanhar o deslocamento do pórtico durante o ensaio. Para aplicar a carga horizontal durante o ensaio, foi utilizado um atuador servo controlado de 250kN, conectado à parede de reação do laboratório. No final do embolo do atuador foi utilizada uma placa metálica. Esta placa metálica, encontra-se conectada a uma outra placa de iguais dimensões, colocada no lado oposto do pórtico. Para conectar as placas utilizaram-se dois varões de aço de 50mm. Isto torna possível aplicar a carga nos dois sentidos durante o ensaio.

Na Figura 5(b), apresenta-se o esquema da instrumentação utilizada, para registar os deslocamentos mais relevantes durante o ensaio no cíclico no plano.



**Figura 5 - Ensaio no Plano, (a) esquema de ensaio, (b) esquema de instrumentação.**

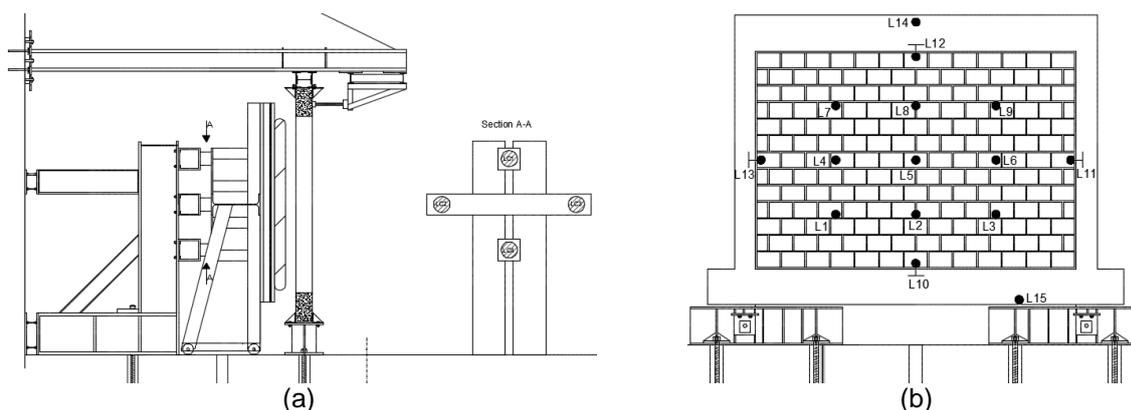
Para registar os deslocamentos nos pontos seleccionados, foram utilizados dezoito transdutores lineares (LVDT).

No caso dos ensaios para fora do plano, o esquema de ensaio é apresentado na Figura 6(a). O pórtico com a parede de enchimento está colocado nos mesmo suportes metálicos utilizados para o ensaio no plano. As restrições para fora do plano foram reforçadas, de

modo a evitar qualquer deslocamento do pórtico nesta direção. Para isso, utilizaram-se quatro varão de aço, conectado a uma estrutura de aço presente no topo do pórtico (ver Figura 6(a)).

A aplicação da carga para fora do plano é realizada com recurso a um airbag, que se encontra conectado a uma estrutura de suporte externa. Esta estrutura possui quatro rolos na parte inferior que se permite deslizar sem atrito, na direção em que a carga está a ser aplicada. Esta estrutura de suporte encontra-se em contacto com quatro células de carga para medir a carga que é aplicada às paredes de enchimento pelo airbag. Na Figura 6(a)), é possível observar um detalhe sobre o sistema das quatro células de carga (corte A-A'). A estrutura de suporte, onde as células de carga se encontram ligadas, foi firmemente amarrada à laje de reação e à parede de reação lateral, para impedir qualquer elevação e deslizamento da estrutura de reação para fora do plano.

O esquema de instrumentação dos ensaios para fora do plano, é mostrado na Figura 6(b).



**Figura 6 - Ensaio para fora do plano, (a) esquema de ensaio, (b) esquema de instrumentação.**

Um total de quinze LVDT foram colocados na parede a ensaiar, para monitorar a sua deformação, enquanto era aplicada a carga para fora do plano.

Os ensaios no plano foram realizados em controlo de deslocamento, impondo diferentes níveis de deslocamento através do atuador hidráulico servo controlado. O padrão de carga foi definido de acordo com a FEMA 461, (FEMA, 2007). É composto por um sinal sinusoidal com 16 ciclos de deslocamento diferentes que começam nos 0.5mm (0.026% *drift*) até um deslocamento de 75mm, correspondente a um *drift* de 3.94%, (Akhoundi et al., 2015). Cada ciclo de deslocamento é repetido duas vezes, a exceção do primeiro que é repetido seis vezes. A amplitude  $a_{i+1}$  do ciclo  $i + 1$  é 1.4 vezes a amplitude  $a_i$  do ciclo  $i$ .

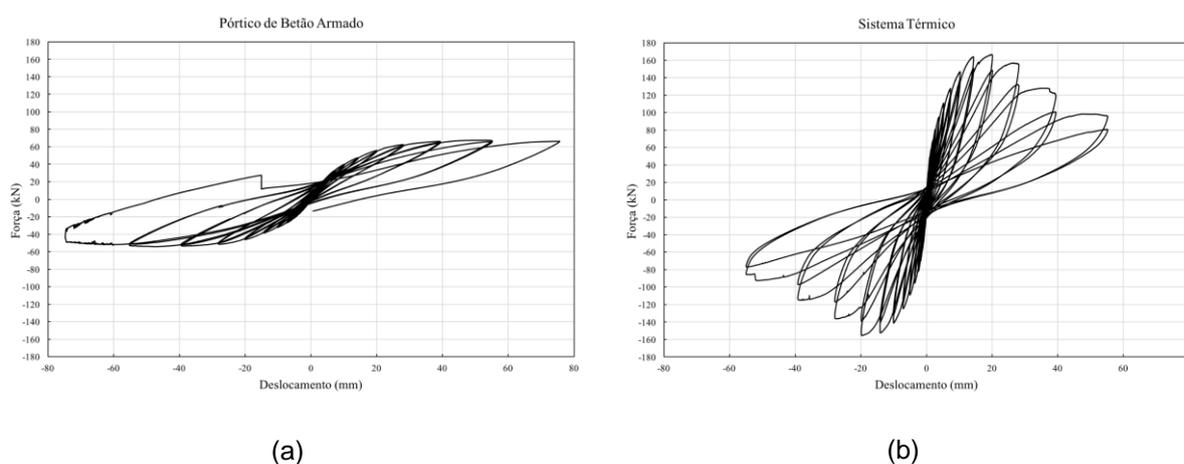
No caso do padrão de carga para fora do plano, foi seguida a mesma abordagem, sendo o ensaio realizado em controlo de deslocamentos, (Akhoundi et al., 2015). O controlo do

ensaio, é realizado com base nos deslocamentos do ponto central do painel de enchimento. A carga foi aplicada numa direção, com objetivo de obter as deformações experimentadas pelo painel de alvenaria, a propagação de fendas e a performance das interfaces entre o painel de alvenaria e a estrutura de betão armado.

A campanha experimental apresentada, é composta por quatro paredes. No plano, foi ensaiado um pórtico de betão armado sem qualquer preenchimento para servir como referência, e uma parede com o sistema Térmico. Para fora do plano, foram ensaiadas duas paredes. Uma parede do sistema Térmico sem a utilização dos reforços horizontais e conetores, para servir como referência, sendo depois ensaiada uma segunda parede com o sistema completo para avaliar a influência da sua utilização neste sistema.

### 3.1 Comportamento no plano

Os diagramas força-deslocamento obtidos para os ensaios no plano realizados ao pórtico de betão armado) sem qualquer tipo de preenchimento e o pórtico com sistema Térmico, são apresentado na Figura 7. As forças registadas correspondem à célula de carga do atuador colocado à meia altura da viga superior. No caso dos deslocamentos, estes correspondem às LVDT 18, também colocado à meia altura da viga superior.



**Figura 7 - Diagrama Força-Deslocamento, (a) pórtico de betão armado sem preenchimento, (b) pórtico de betão armado com sistema térmico.**

As forças e deslocamentos positivos, são obtidos na direção para a qual o atuador hidráulico empurra o provete, enquanto que as forças e deslocamentos negativos, são obtidos para a direção em que o atuador puxa o provete.

A resposta do pórtico sem preenchimento, apresenta alguma diferença, entre a direção positiva e negativa. O provete atingiu uma força máxima lateral de 68kN, para um

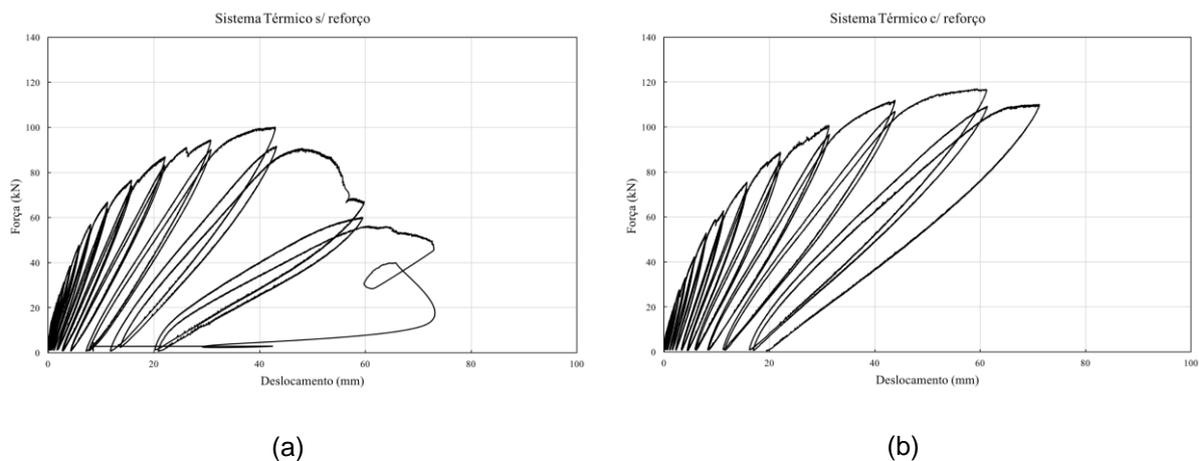
deslocamento de 53mm, o que corresponde a um drift lateral de 2.78%. Depois de atingir a carga máxima, existiu uma ligeira diminuição da força lateral para 66kN, registada para o deslocamento de 75mm (3.94% drift). Na direção negativa o provete apresenta um comportamento similar. A carga máxima é de -54kN, para um deslocamento de -47mm (2.47% drift). Para o deslocamento máximo de -75mm, a força registada foi de 52kN.

No caso do pórtico com o sistema térmico, existe um grande aumento de força lateral suportada. Neste caso a força lateral máxima atingida foi de 167kN (+150%), para um deslocamento lateral de 20mm (1.04% drift), evidenciando um grande aumento de rigidez face ao outro ensaio. No entanto apesar deste aumento da carga lateral suportada, após o pico ser atingido, existe uma grande degradação da carga, fazendo com que para o último ciclo, com um deslocamento de 55mm, a carga máxima suportada seja de 95kN. No caso da direção negativa, o comportamento é bastante semelhante ao ramo positivo, a carga máxima atingida é de 155kN, para o deslocamento de -20mm. A força lateral residual no ultimo ciclo é de -84kN.

### 3.2 Comportamento para fora do plano

Os ensaios para fora do plano, foram realizados só para a direção positiva, uma vez que a carga é aplicada por meio de um airbag. Foram ensaiadas duas com o sistema térmico (sem e com armadura de junta e conectores metálicos).

Os digramas força-deslocamento para a parede sem armadura de junta e conectores metálicos, é apresentado na Figura 8(a). Já no caso da parede com as armaduras e conectores o diagrama força-deslocamento é mostrado na Figura 8(b).



**Figura 8 - Diagrama Força-Deslocamento, (a) sistema térmico sem armadura de junta e conectores, (b) sistema térmico com armadura de junta e conectores.**

No caso da parede, do sistema térmico, sem armadura de junta e conetores, o comportamento começa por ser elástico linear, até à abertura das primeiras fendas. Depois disso a paredes, assume um comportamento não linear, que por efeito de arco, faz com que a carga máxima suportada pela parede seja de cerca de 100kN para um deslocamento de 42mm (2,2% drift), na zona central do painel de alvenaria. Após ser atingindo o máximo, existe uma deterioração da capacidade máxima do sistema, acabando a parede por colapsar para uma carga de 45kN, para um deslocamento de cerca de 73mm (3.83% drift).

No caso da parede com armadura de junta e conetores, a fase inicial do comportamento, é muito semelhante à anterior. A grande diferença acontece nos últimos ciclos de carga, onde o comportamento é claramente não linear e a presença dos reforços se faz notar. Neste caso a carga máxima que a parede consegue suportar são 117kN (+17%), para um deslocamento do centro da parede, igual a 61mm (3,2% drift) (+1%drift). A adição das armaduras e dos conetores, permitiu que a após a carga máxima, não exista uma grande degradação da carga que a parede consegue suportar. Por razões de segurança o último ciclo de carga, foi realizado até um deslocamento máximo de 71mm (3,72% drift), conseguindo a parede suportar 110kN. Apesar da parede se encontrar próxima do colapso, situação pela qual se decidiu parar o ensaio, esta apresenta-se muito mais íntegra do que a parede sem reforços, suportando mais carga para o mesmo nível de deslocamento.

#### 4. CONCLUSÕES

Neste artigo foram obtidos alguns resultados dos ensaios realizados para a caracterização experimental de uma nova solução para a construção de paredes de enchimento proposta pela universidade do Minho, no âmbito do projeto europeu INSYSME.

No caso dos ensaios cíclicos no plano o pórtico com o sistema térmico conseguiu alcançar mais 150% de força lateral, quando comparado com o pórtico sem preenchimento. No caso da degradação da resistência entre repetições, a parede com o sistema térmico, apresentou mais degradação nas repetições dos ciclos para um dado nível de deslocamento. No caso da rigidez, como seria de esperar o pórtico com o sistema térmico, apresenta maior rigidez do que o pórtico sem preenchimento, sendo mais lenta a degradação da rigidez na fase não linear do ensaio. No caso dos ensaios fora do plano, a adição da armadura de junta e conetores, permitiu aumentar a força máxima em 17%, aumentando também o deslocamento para o qual esta força máxima ocorre, permitindo obter maior ductilidade da parede no carregamento para fora do plano.

## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento do Sétimo Programa-Quadro da União Europeia para a investigação, desenvolvimento tecnológico e demonstração nos termos do acordo de subvenção N° 606229, que apoiou este trabalho.

Este trabalho também foi apoiado pela FCT (Fundação Portuguesa para Ciência e Tecnologia), através do projeto ISISE, UID/ECI/04029/2013.

## 6. REFERÊNCIAS

- Akhoundi, F., Vasconcelos, G., Lourenço, P., Palha, C., Silva, L. 2015. In-plane and out-of-plane experimental characterization of RC masonry infilled frames, 6th International Conference on Mechanics and Materials in Design, 427-440.
- Al-Chaar, G., Issa, M., Sweeney, S. 2002. Behavior of masonry-infilled nonductile reinforced concrete frames, *Journal of Structural Engineering*, 12 (8), 1055-1063.
- Bertero, V.V., Brokken, S. 1983. Infills in seismic resistant building, *Journal of Structural Engineering*, 109(6), 1337-1361.
- Braga F, Manfredi V, Masi A, Salvatori A, Vona M. 2011. Performance of non-structural elements in RC buildings during the L'Aquila, 2009 earthquake. *Bull Earthquake Eng*; 9:307-24.
- EN 1998-1 2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings, European Standard. CEN. Brussels.
- FEMA461 2007. Interim Testing Protocols for Determining the Seismic Performance Characteristics of Structural and Nonstructural Components.
- Fiorato, A. E., et al. 1970. An investigation of the interaction of reinforced concrete frames with masonry filler walls", University of Illinois.
- Furtado, A., Costa, C., Arêde, A., Rodrigues, H. 2015. Geometric characterization of Portuguese RC buildings with masonry infill walls stock. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*.
- Jorquera, L. G. 1964. Estudio experimental sobre la resistencia de muros de albñileria sometidos a cargas horizontales, *Revista del IDIEM*, Vol. 3.
- Karakostas C, Lekidis V, Makarios T, Salonikios T, Sous I, Demosthenous M. 2005. Seismic response of structures and infrastructure facilities during the Lefkada, Greece earthquake of 14/8/2003. *Engineering Structures*, 27:213–227.
- Lourenço, P., Vasconcelos, G., Medeiros, P., Gouveia, J. 2010. Vertically perforated clay brick masonry for loadbearing and non-loadbearing masonry walls, *Construction and Building Materials*, 24, 2317-2330.
- Magenes, G., Bracchi, S., Graziotti, F., Mandirola, M., Manzini, C.F., Morandi, P., Palmieri, M., Penna, A., Rosti, A., Rota, M., Tondelli, M. 2012. Preliminary damage survey to masonry structures after the May 2012 Emilia earthquakes, v.1, <http://www.eqclearinghouse.org/2012-05-20-italy-it>.
- Pompeu dos Santos, S. 2007. Enclosure masonry walls systems worldwide, CIB Publication, Taylor and Francis.
- Vicente R., Rodrigues H., Costa A., Varum H., Mendes da Silva J.A.R. 2010. Masonry enclosure walls: lessons learnt from the recent Abruzzo Earthquake. *Proc. 14th European Conference of Earthquake Engineering*.
- Vintzileou, E., Tassios, T.P., 1989. Seismic behaviour and design of infilled R.C. frames. *European Earthquake Engineering*, 3 (2), p. 22-28.