PRINCIPAIS DESAFIOS E DESENVOLVIMENTOS EM ENSAIOS PARA FORA-DO-PLANO DE PAREDES DE ENCHIMENTO À ESCALA REAL

CHALLENGES AND MAIN FEATURES ON OUT-OF-PLANE TESTS OF FULL-SCALE INFILL MASONRY WALLS

Arêde, António, CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, aarede@fe.up.pt

Furtado, André, CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, afurtado@fe.up.pt

Melo, José; CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, josemelo@fe.up.pt

Pinto, Nuno; CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, npinto@fe.up.pt

Rodrigues, Hugo, RISCO – Escola de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Leiria, Departamento de Engenharia Civil, Leiria, Portugal, hugo.f.rodrigues@ipleiria.pt

Varum, Humberto, CONSTRUCT-LESE, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal, hvarum@fe.up.pt

RESUMO

As ocorrências de vários episódios sísmicos nos últimos anos vêm evidenciando a vulnerabilidade das paredes de enchimento guando sujeitas a acões para fora do seu plano, em particular guando combinadas com ações no plano, existindo um reduzido número de ensaios sobre este tipo de elementos. Têm sido realizadas campanhas experimentais com o objetivo de caracterizar o comportamento sísmico destes elementos e de forma a avaliar a influência de diferentes variáveis, como a geometria, tipo de apoio, presença de aberturas, entre outros. No entanto, o número de estudos em paredes de alvenaria de enchimento em modelos à escala real é muito reduzido. Baseada nesta motivação, decorre uma campanha experimental no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) de ensaios de paredes de enchimento à escala real sujeitas a ações para fora-doplano. A plataforma de ensaios inovadora desenvolvida tinha como base a aplicação de uma ação nas paredes de alvenaria para fora do plano com recurso a airbags. Esta plataforma foi recentemente melhorada e atualizada com um novo sistema de aplicação da carga, com recurso a uma matriz de atuadores pneumáticos, o que permite uma maior versatilidade no tipo de ensaios a realizar. O presente artigo pretende apresentar os detalhes relativos a cada um dos setups, acompanhado de uma análise crítica das vantagens e desvantagens de cada um. Serão apresentados resultados experimentais realizados para validação da plataforma de ensaios.

ABSTRACT

It is widely consensual that further and deeper research is required on the out-of-plane seismic response of infill masonry walls to increase the knowledge regarding this behaviour and to develop effective retrofit strategies for preventing panel collapse, increasing human life protection and reducing economic losses. This type of study is also important to support the development of accurate numerical models capable to simulate the expected response of IM walls subjected to out-of-plane loadings, combined or not with in-plane loadings. In this context, experimental testing is key to characterize the infill panels cyclic behaviour subjected to static or dynamic cyclic loads addressing a few issues, such as: different levels of previous damage, boundary conditions, reduced width support, etc. However, such experimental tests are difficult to perform since complex experimental set-ups are required with enough capacity for testing full-scale samples. At the Laboratory for Earthquake and Structural Engineering (LESE) of the University of Porto, a few experimental studies were carried out to characterize the out-of-plane performance of infill panels. Two different approaches were adopted to apply the out-of-plane loadings, one by using airbags and other by using pneumatic actuators. Further information regarding both test setups will be described and discussed throughout the manuscript. Experimental results of two specimens tested with the both testing platforms will be presented highlighting the main differences and similarities.

1 - INTRODUÇÃO

A engenharia de estruturas utiliza os ensaios experimentais para caracterizar o comportamento expectável de estruturas ou de elementos estruturais, assim como caracterizar as suas propriedades

mecânicas e materiais. A informação resultante desta caracterização experimental é extremamente importante para a avaliação de estruturas existentes e dimensionamento de estruturas novas. Podem ser realizados diferentes tipos de ensaios com o mesmo objetivo, sejam eles monotónicos ou cíclicos, quase-estáticos ou dinâmicos para caracterizar a resposta dinâmica de uma estrutura ou de um determinado elemento.

Os últimos anos revelaram uma preocupação especial por parte da comunidade científica relativamente ao comportamento sísmico das paredes de alvenaria de enchimento e a sua interação com a estrutura de betão armado. É unânime o reconhecimento que esta interação pode ser favorável para a estrutura ou não, dependendo de uma série de aspetos, pormenores construtivos propriedades materiais, rigidez e resistência relativa entre a estrutura de betão armado e a alvenaria, existência de ligação entre os painéis de enchimento e a estrutura, entre outros fatores (Furtado *et al.* 2016; Hermanns *et al.* 2014; Lee and Woo 2002; Romão *et al.* 2013; Vicente *et al.* 2012).

Das observações realizadas em missões de reconhecimento de danos pós-sismo a estruturas de betão armado em sismos recentes resultaram as seguintes conclusões: i) um número significativo de edifícios de betão armado sofreu danos extensos ou mesmo o colapso devido ao desempenho deficiente dos painéis de enchimento (De Luca *et al.* 2014; Furtado *et al.* 2015); ii) o comportamento no plano pode desempenhar um papel importante no desenvolvimento do "efeito de arco" quando o painel é solicitado por uma ação para fora-do-plano; iii) a maioria dos danos observados em edifícios de betão armado foi relativo aos painéis de alvenaria, nomeadamente destacamento do painel da estrutura envolvente (Figura 1a), fissuração diagonal (Figura 1b), esmagamento dos cantos, rotura por corte (Figura 1c) e o colapso para fora do plano (Figura 1d), sendo que grande parte se deve a uma ausência ou deficiente ligação à estrutura de betão armado. Dois tipos de mecanismos podem ser igualmente desencadeados pela presença das paredes de enchimento, nomeadamente o mecanismo de pilar curto (Figura 1e) e o mecanismo de piso flexível (Figura 1f). Este tipo de danos requer um elevado impacto económico a nível macro. É importante igualmente destacar que estas intervenções requerem na sua generalidade a interdição da utilização dos edifícios.



Figura 1 - Exemplos de danos observados em painéis de alvenaria ou causados pela presença de painéis de alvenaria em estruturas de betão armado: a) destacamento do painel de alvenaria (Varum *et al.* 2017); b) fissuração diagonal (Varum *et al.* 2017); c) deslizamento no centro do painel (Varum *et al.* 2017); d) colapso para fora-do-plano; e) mecanismo de pilar-curto; e f) mecanismo de piso-flexível (Varum *et al.* 2017).

Muitos autores têm dedicado a sua atenção ao estudo do comportamento para fora-do-plano de paredes de enchimento (Anil *et al.* 2012; Calvi and Bolognini 2001; Furtado *et al.* 2016; Griffith *et al.*

2007), tendo estes verificado que as principais variáveis que influenciam a sua resposta são: a) (ausência) ligação do painel à estrutura envolvente; b) existência de dano prévio; c) redução da largura de suporte dos painéis de enchimento devido a opção construtiva para execução de correções de pontes térmicas por exemplo; d) condições fronteira; e) esbelteza do painel de enchimento e f) mão-de-obra. Além de todas as consequências decorrentes do colapso para fora-do-plano (humano, material e económico), foi igualmente destacado pelos autores que este mecanismo pode resultar numa irregularidade em altura ou/e em planta em termos de rigidez, o que pode desencadear a formação de diferentes mecanismos tais como torsão ou piso flexível, que podem desempenhar um papel chave na resposta sísmica global do edifício.

Assim, devido à inexistência de um conhecimento consolidado do comportamento sísmico de painéis de enchimento tem-se observado por parte da comunidade científica um número crescente de atividades experimentais relacionadas com esta temática. A maioria dos ensaios experimentais são ensaios de caracterização do comportamento no plano de pórtico de betão armado preenchidos com painéis de alvenaria. Os ensaios de caracterização do comportamento sísmico para fora-do-plano de paredes de enchimento é ainda, nos dias de hoje, um tópico por investigar dado o elevado número de variáveis que estão envolvidas. A maioria destes testes têm sido realizados em espécimes à escala reduzida, muitas vezes justificado por dificuldades inerentes à complexidade dos *setups* experimentais, condições laboratoriais para realizar este tipo de ensaios à escala real.

Durante os últimos anos, foi desenvolvido um *setup* experimental para ensaio de paredes de enchimento à escala real e sujeitas a um carregamento para for-do-plano no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE). A aplicação da carga, foi conseguida de forma uniforme e quase-estática através de *airbags* e posteriormente através de uma matriz de atuadores pneumáticos. O presente artigo pretende apresentar os detalhes relativos a cada um dos *setups*, acompanhado de uma análise critica das vantagens e desvantagens de cada um. Serão apresentados resultados experimentais realizados para validação da plataforma de ensaios.

2 - ENSAIO PARA FORA-DO-PLANO DE PAREDES DE ENCHIMENTO COM RECURSO A AIRBAGS

2.1 - Conceito, vantagens e desvantagens

Um dos maiores desafios no ensaio de paredes de enchimento sujeitas a um carregamento para forado-plano é a capacidade de reprodução dos efeitos da ação sísmica. Ao longo da literatura, pode-se encontrar diversas formas abordagens relativas à aplicação deste carregamento, sejam estes carregamentos pontuais ou carregamentos distribuídos ao longo de todo o painel. Obviamente que, para além de ensaios quase-estáticos, alguns autores decidiram a utilização de ensaios em mesa sísmica para caracterização deste comportamento. Mas ao invés dos ensaios quase-estáticos onde é possível caracterizar de forma detalhada a resposta dos espécimes quando sujeitos a um determinado carregamento, os ensaios dinâmicos em mesa sísmica são normalmente constituídos por ações bidirecionais em que é avaliada a resposta do painel às ações combinadas, o que dificulta o entendimento do efeito de cada ação na sua resposta.

Diferentes estratégias podem ser adotadas para aplicação da carga para fora-do-plano. Este tipo de ensaios começou a ser realizado em paredes de alvenaria de pedra ou de alvenaria estrutural através dos ensaios realizados por Mosallam (2007), onde foi aplicado um carregamento uniforme com recurso a sacos de água e mais tarde, no mesmo ano, Griffith *et al.* (2007) utilizou um conceito similar através de um carregamento uniforme ao longo de todo a superfície da parede com *airbags*. Griffith *et al.* (2007) realizaria mesmo um ensaio quase-estático, cíclico em que para isso utilizou *airbags* em cada uma das faces do espécime. Uma das desvantagens associadas ao uso de *airbags* em ambos os lados é a impossibilidade de observação da evolução dos danos ao longo do ensaio e a dificuldade associada à sincronização entre a atuação dos dois *airbags*.

Ambas as estratégias de aplicação de carregamento utilizaram estruturas de reação devidamente ligadas à laje de reação. Recentemente, Lunn and Rizkalla (2011) realizou uma campanha experimental de ensaios para fora-do-plano de paredes de enchimento com *airbags* tendo ligado mecanicamente através de varões de aço uma parede de reação ao pórtico de betão armado envolvente. Os *airbags* foram colocados entre o painel e a parede de reação permitindo assim uma ação uniformemente distribuída ao longo de toda a superfície do painel. A monitorização do carregamento aplicado era realizada através do controlo das válvulas de pressão.

O uso de cargas pontuais em 4 ou 8 pontos (alinhados e não alinhados) aplicadas por aturadores hidráulicos é uma abordagem cada vez mais comum para ultrapassar as dificuldades inerentes à complexidade dos setups experimentais que envolvem a mobilização global do painel. No entanto,

este tipo de estratégia pode apresentar alguma influência no mecanismo de rotura durante os ensaios na medida em que apenas zonas localizadas do painel são sujeitas ao carregamento, o que em algumas situações revelou-se importante no desenvolvimento do "efeito de arco".



Figura 2 - Estratégias de aplicação de cargas para fora-do-plano em paredes de enchimento: a) airbags com estrutura de reação independente (adaptado de Silva (2017)); b) *airbags* com estrutura de reação ligada a pórtico envolvente (adaptado de Lunn and Rizkalla (2011)); c) aplicação a 4 pontos não alinhados (adaptado de Porto *et al.* (2015) d) aplicação a 4 pontos alinhados (adaptado de Hak *et al.* (2014)).

No Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) foi desenvolvido um sistema de ensaio baseado na aplicação de uma carga distribuída cuja principal vantagem é mobilizar todo o painel de enchimento tendo em conta a contribuição de todas as forças de inércia distribuídas em resultado da excitação sísmica como referido anteriormente. Procurou-se desenvolver um sistema de ensaio e em que fosse possível monitorizar todas as ações desenvolvidas ao longo do ensaio. O setup experimental foi ainda dotado de um sistema de aplicação de carga axial nos pilares de betão armado que pode ser adaptado para ensaios no plano como para fora-do-plano do painel. Foi desenhada uma estrutura de reação metálica e autoequilibrada que tirava partido do pórtico de betão armado envolvente ao painel em teste para fazer reação ao carregamento para fora-do-plano. Foi acoplado ao sistema de ensaio células de cargas individuais que permitem monitorizar a transmissão dos esforços desenvolvidos entre o pórtico de betão armado e a estrutura de reação ao longo do ensaio.

2.2 - Descrição do setup experimental

A realização de testes para fora-do-plano, tendo em vista a caracterização do comportamento da parede de alvenaria de enchimento a ações aplicadas perpendicularmente ao seu plano, consistiu na aplicação, em todo o painel, de uma força uniformemente distribuída por um conjunto de sete *airbags*, que exerciam reação numa estrutura metálica autoequilibrada. Procurou-se deste modo que todo o painel contribuísse para a resposta à solicitação imposta pelos *airbags*, sendo esta aplicada de forma cíclica.

A estrutura metálica de reação foi solidarizada através de barras metálicas dispostas ao longo de cinco alinhamentos verticais, aos quais se encontravam acoplados quatro alinhamentos horizontais que contribuíam para o aumento de rigidez do sistema em questão. A disposição de algumas barras com secções diferentes em relação ao eixo de simetria vertical da estrutura, fez com que no final esta estrutura de reação apresentasse alguma assimetria (Furtado *et al.* 2016). De modo a equilibrar o

peso do sistema metálico principal, tornou-se necessário colocar um perfil metálico, afastado do referido sistema, funcionando como um contrapeso, como se pode observar na Figura 3.





A ligação do conjunto atrás caracterizado com o pórtico de betão armado, no qual estava inserida a parede de alvenaria de enchimento, foi conseguida através da colocação de doze chapas metálicas nos alinhamentos do eixo das vigas e dos pilares do pórtico, convenientemente fixadas quer no elemento de betão armado quer no metálico. Junto ao sistema metálico, a fixação materializava-se pela existência de um pequeno troço de um varão roscado, soldado nos alinhamentos verticais do sistema de reação, que permitia a instalação de células de carga, onde seriam ligadas posteriormente as barras que efetuavam a ligação pórtico-sistema de reação. A fixação à estrutura de betão armado implicou a execução de pequenos furos nos pilares e nas vigas para a passagem das barras de ligação, que após o posicionamento da estrutura de reação possibilitava a colocação de uma chapa metálica, de modo a uniformizar a superfície e logo de seguida a colocação de porcas para finalizar a fixação, como ilustrado na Figura 4a. A necessidade de perceber a interação entre o pórtico de betão armado e o sistema metálico conduziu à instalação das referidas 12 células de carga, permitindo assim uma monitorização contínua dos esforços desenvolvidos ao longo de todo o ensaio (Figura 4b). Foi realizada uma verificação preliminar da capacidade das vigas e dos pilares receberem estes esforços pontuais (distribuídos pelos perfis U ao longo de todo o seu comprimento) tendo-se verificado que para os níveis de carregamento esperados não ocorriam deformações significativas que pudessem introduzir fendilhação nestes elementos.





Foi colocado um atuador hidráulico no topo de cada pilar, tendo sido instalado na parte superior de cada atuador hidráulico um cabeçote metálico, ao qual se encontravam ligados dois varões de alta resistência Dywidags com 30 mm de diâmetro, ligação esta considerada rotulada. Na parte inferior, os Dywidags eram ligados, de forma rotulada, ao perfil metálico que servia de base do pórtico de betão armado. A injeção de óleo no cilindro hidráulico possibilitava que este exercesse reação no perfil metálico, sobre si colocado, tracionando os Dywidags. Consequentemente, cada pilar ficava sujeito a

um esforço de compressão, tanto maior quanto maior fosse o nível de pressão transmitido aos cilindros hidráulicos. De modo a controlar o esforço axial que se estava a aplicar a cada pilar, procedeu-se à colocação de duas células de carga entre o topo do pilar e o cilindro hidráulico. Assim, o registo contínuo efetuado por estas possibilitava verificar se os dois pilares estariam sujeitos a esforços na mesma ordem de grandeza. O pórtico metálico encontrava-se apoiado em toda a sua base, num perfil metálico. A ligação entre estes dois elementos é efetuada através de ligações aparafusadas entre este perfil de base e um outro colocado superiormente à saliência existente na viga inferior do pórtico de betão armado, executada já com esse propósito. Quatro varões de aço de alta resistência, com 30 mm de diâmetro, asseguram a fixação do perfil metálico de base à laje de reação. Face ao exposto, considera-se, relativamente às condições de apoio do pórtico de betão armado na fronteira inferior. A solicitação do painel de alvenaria de enchimento, foi conseguida através da manipulação computorizada da pressão no interior dos *airbags* como será descrito na subsecção 2.3. Na Figura 5 encontra-se ilustrado o esquema do setup desenvolvido para a realização de testes para fora-do-plano de painéis de enchimento.



Figura 5 - Setup experimental para ensaio de paredes de enchimento sujeitas a ações distribuídas para fora do seu plano com recurso a airbags: a) vista frontal b) vista de topo (em corte); e c) vista lateral (em corte).

2.3 - Descrição do sistema de controlo

O sistema de controlo é composto por dois componentes: (i) controlo dos *airbags*; e (ii) controlo do esforço axial aplicado. O controlo dos *airbags* foi realizado através de dois compressores de ar (100lt, 8bar), dois filtros manuais reguladores de pressão (FESTO, LFR-D-MIDI, 0-16bar), duas electroválvulas de controlo direcional (FESTO, MPYE-5-3/8-010-B, 0-10bar) e dois transdutores (pressão e deslocamento). A cada compressor foi ligado um regulador de pressão (definido com um limite de 2bar) e uma electroválvula, respetivamente, de forma a ter duas entradas de ar no conjunto dos *airbags* (uma em cada extremidade do mesmo como descrito mais à frente). A solicitação do painel de alvenaria de enchimento foi conseguida através do controlo da entrada de ar nos *airbags* recorrendo à monitorização da pressão no interior dos mesmos e do deslocamento implementado por estes. O controlo do esforço axial foi realizado através de uma central hidráulica, de dois atuadores e duas células de carga (AEP) com a disposição já descrita anteriormente. Para o controlo de ambos, foi utilizado um computador portátil (onde foram executados dois programas em simultâneo desenvolvidos especificamente para estes fins) e um dispositivo de aquisição de dados multifuncional

(DAQ) da National Instrument (NI6211), com várias entradas/saídas digitais e analógicas, que recolhe os sinais dos transdutores e células de carga e envia sinais para as electroválvulas e central hidráulica. Na Figura 6 pode-se observar o diagrama do sistema de controlo dos ensaios de paredes de enchimento. Sendo apresentado na Figura 6a um diagrama de ligações entre os *airbags* e o sistema de controlo e na Figura 6b do sistema do controlo de ensaios global. O programa de controlo implementado no LESE baseia-se num controlo por deslocamento alvo, onde se define determinado transdutor de deslocamentos como referência e os deslocamentos objetivo ao longo do ensaio. Este cruzamento com o valor registado pelos sensores de pressão permite aferir ao sistema a necessidade de admissão de carga ou descarga de ar para os *airbags*.



Figura 6 - Esquema ilustrativo: a) sistema de ligações entre *airbags* e o sistema de controlo; b) Diagrama do sistema de controlo dos ensaios de paredes de enchimento sujeitas a ações distribuídas para fora do seu plano implementado no LESE.

2.4 - Exemplo aplicativo do sistema de ensaio

A validação do sistema de ensaios aqui apresentado foi realizada através do teste de uma parede de enchimento à escala real, sem aberturas, composta por tijolos cerâmicos de furação horizontal com 15 cm de espessura. O seu assentamento foi conseguido com recurso a uma argamassa pré-doseada do tipo "ciarga", de classe M5. Esta parede foi sujeita a um carregamento cíclico carga-descarga sem carregamento axial nos pilares de betão armado.

Na Figura 7 é apresentada a reposta força-deslocamento da parede ensaiada, onde se destaca o valor registado por cada uma das células de carga (aqui designadas CC) ao longo do ensaio e o somatório destas. Pode-se verificar que através deste tipo de monitorização é possível captar ao detalhe a distribuição dos esforços desenvolvidos ao longo do ensaio. A parede atingiu a força máxima de 63kN para um deslocamento para fora-do-plano de 12mm (ponto central de controle).



Figura 7 - Resultados experimentais: a) Força-deslocamento; b) Evolução ao longo do tempo das forças registadas por cada célula de carga e correspondente somatório.

Adicionalmente foi monitorizado o deslocamento para fora-do-plano da viga superior e inferior do pórtico de betão armado ao longo do ensaio onde foi observado que apenas foi atingido um deslocamento máximo de 1 mm não sendo assim considerado significativo, validando assim o conceito definido e implementado para a estrutura de reação. Observou-se uma rotura trilinear (linha preta) combinado com um ligeiro destacamento do painel em relação ao pórtico (linha azul) como se

pode observar na Figura 8. Observou-se igualmente a concentração da deformação na zona central do painel.



Figura 8 - Resultados experimentais: a) Dano final observado; e b) Padrão de fissuração observado.

3 - ENSAIO PARA FORA-DO-PLANO DE PAREDES DE ENCHIMENTO COM RECURSO A ATUADORES PNEUMÁTICOS

3.1 - Descrição geral

Tendo por base o mesmo conceito que foi detalhado na secção anterior, foi realizado um upgrade do sistema de ensaio de paredes de enchimento sujeitas a carregamentos para fora do seu plano. Este sistema é constituído, por um lado, por uma estrutura metálica de reação, igualmente autoequilibrada e que se liga ao pórtico de betão armado. A principal inovação deste sistema, e o que permitiu que o carregamento fosse aplicado uniformemente na face do painel, é um conjunto de vinte e oito atuadores pneumáticos (Figura 9a), associados, cada um, a uma placa de madeira (Figura 9b) e uma placa de cortiça de medidas 0.50×0.50 m(Figura 9c), para acomodar a distribuição do carregamento sobre toda a superfície da parede de alvenaria. Este sistema permite um melhor e mais eficiente controlo do carregamento, e ainda uma resposta mais rápida dos atuadores tanto na fase ascendente de carregamento como na fase descenedente de descarga. Os atuadores pneumáticos utilizados são o modelo FD200–22CI ("Double Convolution Air Spring") da marca Continental. Este tipo de atuadores possui um curso máximo de 185mm (260h_{max}-75h_{min}), uma capacidade máxima de 20KN para um deslocamento de 100mm (h=175mm) e uma pressão de 8bar.



Figura 9 - Setup experimental para ensaio de paredes de enchimento sujeitas a ações distribuídas para fora do seu plano com recurso a atuadores pneumáticos: a) esquema geral; b) placa de cortiça; c) placa de madeira; e d) atuador pneumático.

Os quatro alinhamentos horizontais onde estão dispostos os atuadores pneumáticos materializam-se através de quatro perfis HEB140. Estes, por sua vez, ligam-se a cinco perfis HEB200, verticais, integrantes da estrutura de reação, que se pode observar na Figura 10. A ligação entre os perfis é rotulada, de forma a permitir movimentos longitudinais. Assim, a estrutura de reação está ligada ao pórtico de betão armado ao longo de doze pontos, (cinco na viga superior, e cinco na viga inferior, nas extremidades dos perfis verticais e uma a meio de cada pilar), tirando, aliás, partido da sua rigidez e tornando todo o sistema autoequilibrado. Nos doze pontos de ligação ao pórtico, instalaram-

se ainda dez células de carga, responsáveis pela monitorização das ações nos ensaios com cargas para fora-do-plano. A fixação à estrutura de betão armado implicou a execução de pequenos furos nos pilares e nas vigas para a colocação das chapas de ligação, estas responsáveis por uniformizar a distribuição da carga ao longo da viga. Uma das grandes vantagens deste sistema é o facto de facilmente se conseguir realizar ensaios a paredes de alvenaria com aberturas, pois, para tal, basta apenas desativar o atuador pneumático respetivo a estas. Do mesmo modo, é possível realizar ensaios com a aplicação de cargas uniforme no painel, ou, com a distribuição que se desejar testar.









Figura 10 - Setup experimental para ensaio de paredes de enchimento sujeitas a ações distribuídas para fora do seu plano com recurso a atuadores pneumáticos: a) esquema geral (vista frontal); b) esquema geral (vista traseira); c) vista traseira; e d) vista lateral.

3.2 - Descrição do sistema de controlo

O sistema de controlo dos atuadores pneumáticos é composto por um compressor de ar (100lt, 8bar), um filtro manual regulador de pressão (FESTO, LFR-D-MIDI, 0-16bar), uma electroválvula de controlo direcional (FESTO, MPYE-5-3/8-010-B, 0-10bar) e dois transdutores de pressão e deslocamento. O compressor de ar liga-se ao regulador de pressão e à electroválvula direcional.

A ação das forças no painel foi conseguida através do controlo da entrada de ar nos atuadores pneumáticos, consoante a sua pressão interior e imposição de deslocamento para fora-do-plano. A Figura 11 apresenta um resumo do sistema de controlo deste tipo de ensaios.



Figura 11 - Setup experimental para ensaio de paredes de enchimento sujeitas a ações distribuídas para fora do seu plano com recurso a atuadores pneumáticos: Sistema de controlo.

3.3 - Exemplo aplicativo do sistema de ensaio

Para validação do sistema de ensaio aqui apresentado, foi testada uma parede simples de enchimento sem aberturas, composta por tijolos cerâmicos de 15 cm de espessura com argamassa pré-doseada do tipo "ciarga", classe M5. A parede, envolvida por um pórtico de betão armado, possui uma dimensão geométrica de 4.20x2.30m, respetivamente comprimento e altura. Esta parede, construída com 1 cm de reboco, foi sujeita a um carregamento cíclico carga-descarga sem carregamento axial nos pilares de betão armado. Na Figura 12 é apresentada a reposta força-deslocamento da parede ensaiada, onde é possível visualizar o valor registado por cada uma das células de carga ao longo do ensaio e o somatório destas. Pode-se verificar que o esforço registado em todas as células de carga são relativamente homogéneos, não existindo muita variação entre células. A parede atingiu a força máxima de 43kN para um deslocamento para fora-do-plano de 22mm (ponto central de controle). A parede atingiu a rotura para um deslocamento para fora-do-plano de 36.5mm, tendo ocorrido o seu colapso de forma frágil. Este sistema de ensaios permite que o sistema de monitorização (transdutores de deslocamento) seja colocado por detrás da estrutura metálica de reação, o que permite levar os ensaios até ao colapso do painel sem que sejam danificados quaisquer tipos de equipamentos.



Figura 12 - Resultados experimentais: a) Força-deslocamento; b) Evolução ao longo do tempo das forças registadas por cada célula de carga e correspondente somatório.

Durante o ensaio observou-se um padrão de fissuração trilinear, com três fissuras bem evidentes, combinadas com um ligeiro destacamento da argamassa no limite superior entre o painel e a viga de betão armado (marcado a azul), e entre o painel e os pilares adjacentes. Na Figura 13 pode-se observar os danos existentes no instante imediatamente anterior ao seu colapso.





4 - Conclusões

O presente trabalho visa abordar uma temática cada vez mais importante que é o comportamento para fora-do-plano das paredes de alvenaria de enchimento. Nesse sentido foram abordadas diferentes formas de caracterizar este comportamento através de ensaios experimentais, quer através de aplicação de carga pontual, quer através de carga distribuída ou mesa sísmica. O contributo da caracterização do comportamento para fora-do-plano deste tipo de elementos considerados não estruturais e fundamentalmente o entendimento da sua capacidade quando sujeita a cargas combinadas no seu plano e fora deste visa calibrar modelos numéricos capazes de simular o seu comportamento expectável caso seja sujeito a uma ação sísmica e desenvolver soluções de reforço que sejam eficientes e permitam melhorar/prevenir o seu comportamento em futuros eventos. Baseado nesta motivação foi desenvolvido um sistema de ensaios para fora-do-plano de paredes de enchimento inovador composto por um sistema de ensaio autoequilibrado de aplicação de forças distribuídas através de airbags, através do qual se consegue caracterizar o seu comportamento. Posteriormente, este mesmo sistema de ensaios foi melhorado e o sistema de aplicação de cargas foi substituído por atuadores pneumáticos. Foram ainda abordadas as vantagens e desvantagens associada ao setup proposto assim como foram realizadas algumas considerações sobre o programa de controlo implementado que se baseia num controlo por deslocamento alvo, onde se define determinado transdutor de deslocamentos como referência e os deslocamentos objetivo ao longo do ensaio. Este cruzamento com o valor registado pelos sensores de pressão permite aferir ao sistema a necessidade de admissão de carga ou descarga de ar para os airbags. Foram apresentados os resultados principais de dois ensaios experimentais relativos à validação de cada um dos setups apresentados.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pelo projeto: POCI-0145-FEDER-007457 - CONSTRUCT - Institute of R&D In Structures and Construction financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 - Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI) e por fundos nacionais da Fundação para a Ciência e a Tecnologia I.P. Este trabalho foi alvo de Este trabalho foi objeto de um financiamento específico da FCT através do projeto PTDC/ECMEST/3790/2014 - Safety Evaluation and Retrofitting of Infill Masonry Enclosure Walls for Seismic Demands (ASPASSI).

REFERÊNCIAS

Anil, O., Tagayoglu, M., and Demirhan, M. (2012). "Out-of-plane behavior of unreinforced masonry brick walls strengthened with CFRP strips." *Construction and Building Materials*, 35, 614-624.

- Calvi, G., and Bolognini, D. (2001). "Seismic response of reinforced concrete frames infilled with weakly reinforced masonry panels." *Journal of Earthquake Engineering*, 5(2), 153-185.
- De Luca, F., Verderame, G., Gómez-Martinez, F., and Pérez-García, A. (2014). "The structural role played by masonry infills on RC buildings performances after the 2011 Lorca, Spain, earthquake." *Bull Earthquake Eng*, 12, 1999-2006.
- Furtado, A., Costa, C., Arêde, A., and Rodrigues, H. (2016). "Geometric characterisation of Portuguese RC buildings with masonry infill walls." *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, pp. 1-16.

- Furtado, A., Rodrigues, H., Arêde, A., and Varum, H. (2016). "Experimental evaluation of out-of-plane capacity of masonry infill walls." *Engineering Structures*, 111, 48-63.
- Furtado, A., Rodrigues, H., Varum, H., and Costa, A. (2015). "Evaluation of different strengthening techniques' efficiency for a soft storey building." *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-18.
- Griffith, M., Vaculik, J., Lam, N., Wilson, J., and Lumantarna, E. (2007). "Cyclic testing of unreinforced masonry walls in two-way bending." *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 36, 801-821.
- Hak, S., Morandi, P., and Magenes, G. (2014). "Out-of-plane experimental response of strong masonry infills." 2nd European Conference on Earthquake Engineering and SeismologyTurkey.
- Hermanns, L., Fraile, A., Alarcón, E., and Álvarez, R. (2014). "Performance of buildings with masonry infill walls during the 2011 Lorca earthquake." *Bull Earthquake Eng*, 12, 1977-1997.
- Lee, H., and Woo, S. (2002). "Effect of msaonry infills on seismic performance of a 3-storey R/C frame with non-seismic detailing." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*(31), 353-378.
- Lunn, D. S., and Rizkalla, S. H. (2011). "Strengthening of Infill Masonry Walls with FRP Materials." *Journal of Composites for Construction*, 15(2), 206-214.
- Mosallam, A. S. (2007). "Out-of-plane flexural behavior of unreinforced red brick walls strengthened with FRP composites." *Composites: Part B*, 38, 16.
- Romão, X., A.A.Costa, Paupério, E., Rodrigues, H., Vicente, R., Varum, H., and Costa, A. (2013). "Field observations and interpretation of the structural performance of constructions after the 11 May 2011Lorca earthquake." *Eng. Fail. Anal.*, 34, 670-692.
- Silva, L. (2017). "Experimental and numerical study of new systems for earthquake resistant masonry enclosures in reinforced concrete buildings, Thesis Project." University of Minho, Guimarães, Portugal.
- Varum, H., Furtado, A., Rodrigues, H., Oliveira, J., Vila-Pouca, N., and Arêde, A. (2017). "Seismic performance of the infill masonry walls and ambient vibration tests after the Ghorka 2015, Nepal earthquake " *Bull Earthquake Eng*, 15(3), 1-28.
- Vicente, R., Rodrigues, H., Varum, H., Costa, A., and Mendes da Silva, R. (2012). "Performance of masonry enclosure walls: lessons learned from recent earthquakes." *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 11(1), 23-34.