

## Comportamento a acções perpendiculares ao plano, de alvenaria de enchimento com dano prévio



**M. F. Paulo Pereira<sup>1</sup>**



**Pedro Medeiros<sup>2</sup>**



**M. F. Neto Pereira<sup>3</sup>**



**Paulo B. Lourenço<sup>4</sup>**

### RESUMO

Com a entrada em fase de obrigatoriedade dos Eurocódigos surgem novos requisitos que têm de ser cumpridos pelos edifícios, ou pelas suas partes. É o caso da exigência de garantia de estabilidade de painéis de alvenaria não estrutural, à acção sísmica perpendicular ao plano, em edifícios com sistema estrutural de betão armado.

Este documento apresenta a campanha de ensaios realizada na Universidade do Minho, com vista à caracterização do comportamento de elementos deste tipo a estas acções, quando danificados previamente por acções no plano. Para o efeito o esquema de ensaio proposto é composto por duas fases. Na primeira o painel é sujeito, de forma cíclica e gradual, a um nível de deslocamento de referência no plano. Na segunda é sujeito a uma acção cíclica, uniforme e perpendicular ao plano. Serão testadas e comparadas quatro soluções construtivas distintas, nomeadamente: parede simples não reforçada, parede dupla não reforçada, parede simples com reforço em junta horizontal e parede simples com reforço em malha de aço. De acordo com o desenvolvimento dos trabalhos, serão apresentados os resultados de uma parede simples.

### PALAVRAS-CHAVE

Alvenaria de enchimento, Acção no plano, Acção perpendicular ao plano, Cíclico

<sup>1</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. [pp@ppsec.pt](mailto:pp@ppsec.pt)

<sup>2</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. [pedromedeiros@civil.uminho.pt](mailto:pedromedeiros@civil.uminho.pt)

<sup>3</sup> Faculdade de Engenharia do Porto, Departamento de Engenharia Civil, 4200-465 Porto, Portugal. [np@ppsec.pt](mailto:np@ppsec.pt)

<sup>4</sup> Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, 4800-058 Guimarães, Portugal. [pbl@civil.uminho.pt](mailto:pbl@civil.uminho.pt)

## **1. INTRODUÇÃO**

A envolvente dos edifícios em Portugal é constituída quase exclusivamente por paredes de alvenaria, que têm principalmente as funções de vedação e enchimento. Estas constituem um dos subsistemas mais importantes presentes nos edifícios, separando o ambiente interior do exterior e são decisivas para o desempenho dos edifícios. Apesar da sua inegável importância, as alvenarias, de um modo geral, são objecto de poucos cuidados, para o que contribuem as suas particularidades como elemento construtivo, que associadas à falta da tradição de investigar, ensinar e pormenorizar cuidadosamente as alvenarias, representam um grande obstáculo, pois são um dos subsistemas onde se verificam maiores desajustes de desempenho e consequentemente de anomalias.

Nos últimos anos, muito se tem falado no nosso país acerca da vulnerabilidade sísmica dos edifícios, decorrente da insuficiente resistência, da adopção de materiais e técnicas de construção desadequadas, alterações ao projecto original e à falta de manutenção. Se bem que as estruturas de betão armado tenham legislação adequada para minimizar tais efeitos, as alvenarias só com a entrada em vigor do EC6 e EC8 é que terão o seu enquadramento legal.

Já alguns autores se debruçaram sobre esta temática, nomeadamente, Calvi et al [1] que levou a cabo uma série de ensaios com o intuito de conhecer a resposta sísmica de pórticos de betão armado com painéis de alvenaria. Neste estudo três situações distintas de reforço foram estudadas: sem reforço, reforço na argamassa colocado horizontalmente e reforço colocado no reboco verticalmente. Dos ensaios efectuados concluiu-se que todos os tipos de reforço são eficientes ou reduzem significativamente o dano do painel, a presença de reforço no reboco melhora de forma bastante significativa a rigidez, a capacidade de dissipação de energia e a força máxima obtida.

## **2. PROGRAMA EXPERIMENTAL**

### **2.1 Objectivos**

O objectivo do presente trabalho é a avaliação do comportamento a acções perpendiculares ao plano, de alvenaria de enchimento com dano prévio no plano.

### **2.2 Metodologia**

A primeira fase do trabalho, foi efectuada uma recolha bibliográfica e uma modelação prévias dos painéis com dados mecânicos disponibilizados nessa bibliografia. Resultou a definição das características geométricas, secções de elementos de betão armado e deslocamentos a aplicar. A segunda fase do trabalho consistiu na avaliação do comportamento mecânico de provetes de alvenaria com interesse na tipificação dos painéis de alvenaria em estudo. Na fase final, os painéis de alvenaria, foram ensaiados no plano e posteriormente para fora do plano.

## **3. CARACTERIZAÇÃO DE PAINÉIS DE ALVENARIA**

Os tipos de amostra considerados e as suas referências são as seguintes: 1) Wall\_REF01 - Pórtico de betão armado preenchido com alvenaria; 2) Wall\_DPA01 - Pórtico de betão armado preenchido a alvenaria rebocada; 3) Wall\_JAR01 - Pórtico de betão armado preenchido a alvenaria rebocada, com reforço nas juntas horizontais; 4) Wall\_RAR01 - Pórtico de betão armado preenchido a alvenaria, com reforço em malha metálica embebida no reboco da face exterior e interior do painel.

A geometria foi condicionada, pelo enquadramento deste trabalho num estudo mais vasto, em curso na Escola de Engenharia da Universidade do Minho. Desse estudo resultou a definição de um modelo de edifício do qual foi extraído um painel para ensaiar a resposta mecânica no plano e para fora do plano. O painel considerado é do primeiro andar da fachada de pano único de alvenaria do modelo considerado para os edifícios, ver Fig. 1 – a). A geométrica resultante, com as adaptações necessárias para levar a efeito os ensaios, é a representada na Fig. 1 – b).

Este trabalho, só irá incidir sobre uma amostra da parede “Wall\_REF01”. A parede é considerada, como a amostra de referência, sendo constituída por um pano simples de tijolo sem qualquer revestimento exterior.

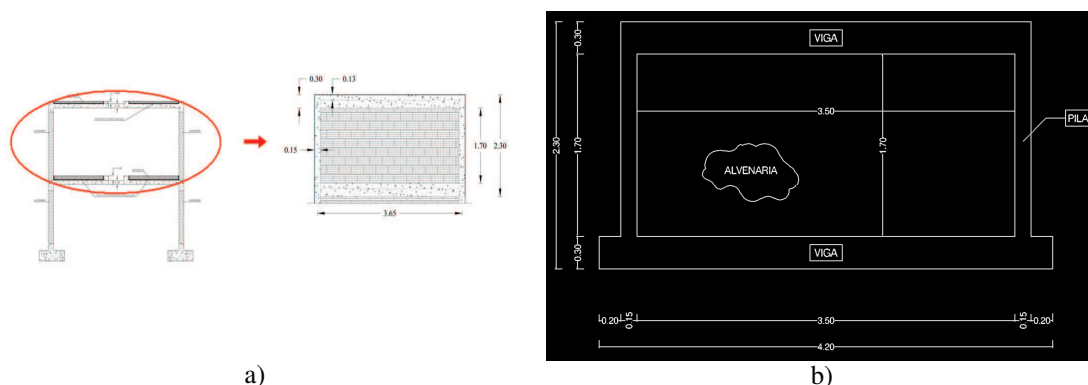


Figura 1 – Caracterização dos painéis de alvenaria: a) Localização; b) Geometria

### 3.1 Processo construtivo

Com a campanha experimental pretende-se determinar o comportamento de pórticos preenchidos de alvenaria, sem e com reforço, construídos de acordo com o processo construtivo tradicional. O processo construtivo das paredes consistiu nas seguintes etapas: 1) construção e cura dos pórticos de betão armado, Fig- 2 – a); 2) construção do painel de alvenaria de preenchimento (com ou sem reforço), ver Fig. 2 – b) e; 3) colocação de reboco (com ou sem reforço). O processo construtivo tem particular importância, devido às consequências em termos de comportamento, no modo de construção do painel de enchimento. A colocação da alvenaria é feita por fiadas horizontais sucessivas, sempre a partir de um dos pilares. À primeira unidade de alvenaria é aplicada argamassa na face de assentamento e na face vertical. A unidade é então pressionada contra a base de assentamento e contra o pilar de início. A última unidade em cada fiada horizontal é, para efeitos de compatibilidade dimensional, normalmente cortada. Nas situações em que a geometria do painel inviabiliza o corte, os espaços são preenchidos com argamassa. A geometria do painel conduziu a uma situação deste tipo. Na última fiada horizontal as unidades são cortadas de forma a conseguirem ser acomodadas à geometria da moldura de betão. O espaço entre a unidade e a viga é preenchido, de forma deficiente, com argamassa.



Figura 2 – Fases construtivas dos painéis: a) Betonagem dos pórticos; b) Construção das paredes.

### 3.1 Estimativa resistência

De modo a se ter uma melhor noção da influência de cada nível de deformação de referência, no comportamento das várias soluções de reforço que se pretende estudar, foi desenvolvido um modelo não linear de elementos finitos. Este modelo, embora preliminar, permitiu determinar, além dos esforços máximos esperados para as várias soluções de reforço, o nível de degradação do painel para cada deformação, recomendada pelas fontes consultadas.

Os modelos foram calibrados com base nas características mecânicas determinadas por Calvi [1], uma vez que as unidades utilizadas por este autor têm geometria semelhante às que irão ser utilizadas nos ensaios planeados (furação horizontal, com 14 cm de espessura).

O modelo de elementos finitos forneceu, além da determinação dos níveis de dano, a estimativa do nível de força associada ao ensaio, que permitiu o dimensionamento da estrutura de suporte e escolha do equipamento de aplicação de carga. A Fig. 3, apresenta os resultados obtidos da análise para as várias soluções de reforço.

Comportamento a acções perpendiculares ao plano, de alvenaria de enchimento com dano prévio

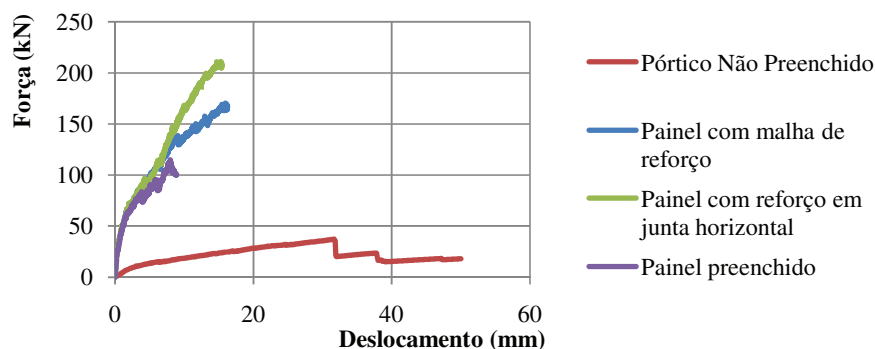


Figura 3 – Estimativa, com base em modelo de elementos finitos, da relação força vs deslocamento, para ensaio de aplicação de força no plano, para as soluções estudadas.

### 3.2. Sistema de Ensaio

Para a realização dos ensaios no plano (Fig. 4) e para fora do plano (Fig. 5), houve a necessidade de criar uma infra-estrutura que permitisse aplicar ao painel de alvenaria deslocamentos que se processassem em ambas as direcções.

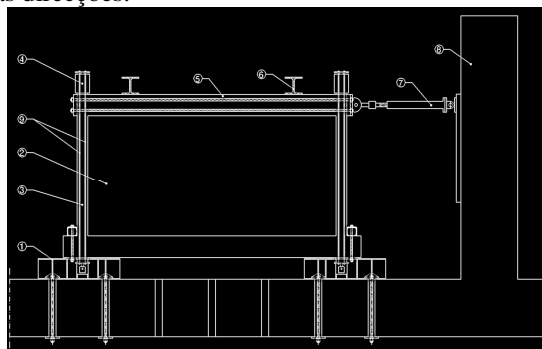


Figura 4 - Infra-estrutura para o ensaio no plano. 1 - Bases metálicas; 2 - painel de alvenaria; 3 - Pórtico de betão armado; 4 - Actuador que permite traduzir as cargas do piso superior que actuam sobre os pilares; 5 - Tirantes de aço, que permitem a inversão do sentido de carga; 6 - Perfil metálico, ligado à laje de betão na base, que confere reacção aos actuadores verticais; 7 - Actuador horizontal servo-controlado, com capacidade para controle em deslocamento ou em força; 8 - Parede de reacção; 9 - Tirantes de reacção

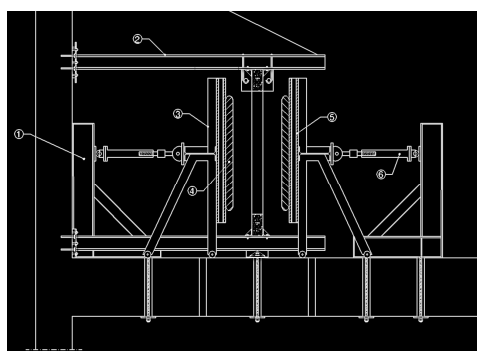


Figura 5 - Infra-estrutura para o ensaio fora do plano: 1 - Pórtico de reacção para o actuador horizontal; 2 - Viga transversal para o pórtico de betão armado; 3 - Estrutura de aplicação de carga e de suporte para os airbags; 4 - Airbags; 5 - Painel de madeira; 6 - Actuador horizontal

### 3.3. Procedimento de ensaio

#### 3.3.1 No Plano

O ensaio no plano é efectuado aplicando deslocamentos horizontais cíclicos ao painel de alvenaria até atingir um valor previamente estabelecido (0.5%). Optou-se pela realização de um ensaio cíclico por corresponder a uma melhor simulação do efeito de um sismo. No ensaio no plano foi prevista a aplicação de cargas verticais nas zonas dos pilares. Essas cargas foram materializadas sobre a forma de dois actuadores, cada um sobre um pilar. Estes actuadores tinham um sistema de tirantes, que ligavam o topo do actuador à base da infra-estrutura de ensaio. Com vista à determinação da contribuição de cada uma das componentes do painel para o seu comportamento o ensaio de aplicação de carga horizontal no plano foi monitorizado com recurso ao esquema de monitorização apresentado na Fig. 6.

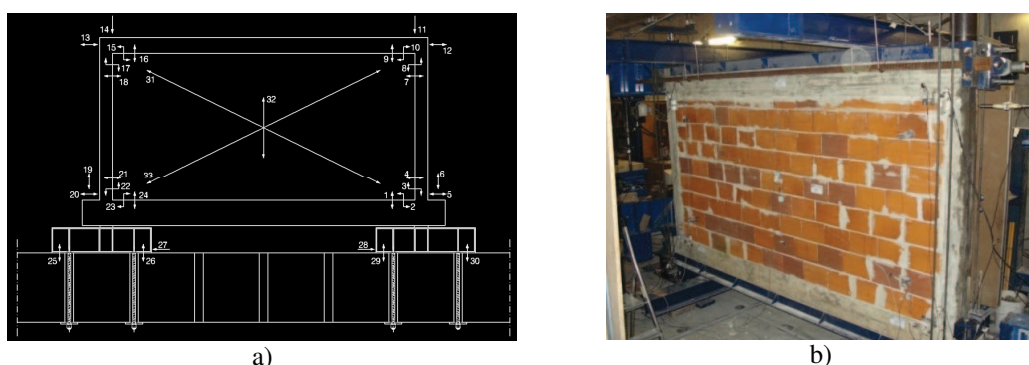


Figura 6 – Instrumentação no plano: a) Esquema; b) Vista geral.

### 3.3.2 Fora do Plano

O ensaio para fora do plano consistiu na aplicação de deslocamentos ao painel em ambos os sentidos. Esses deslocamentos foram transmitidos ao painel através de dois actuadores, um para cada direcção. Estes actuadores transmitiam a carga a uma estrutura, estrutura esta onde se encontravam quatro airbags que faziam a transmissão final de carga, ver Fig. 7 – a. Os airbags encontravam-se ligados entre si, através de um sistema hidráulico, de modo a terem todos a mesma pressão, efeito este que possibilita o equilíbrio de pressão entre eles e, conseqüentemente a transmissão de uma carga distribuída ao painel de alvenaria, ver Fig. 7 – b).



Figura 7 – Infra-estrutura de ensaio: a) Painel de transmissão de carga; b) Airbags

Para a realização do ensaio para fora plano, foi criado o mapa de instrumentação apresentado na Fig. 8. Com este mapa de instrumentação, pretendia-se conhecer os deslocamentos de vários pontos do painel de modo a recolher os dados mais relevantes para o conhecimento do comportamento da parede de alvenaria quando sujeita a acções para fora do plano.

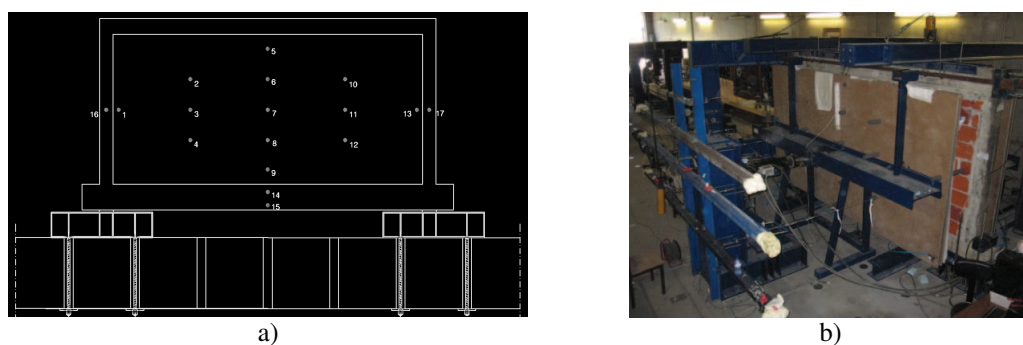


Figura 8 – Instrumentação para fora do plano: a) Esquema; b) Vista geral

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Ensaio no plano

O comportamento do painel até à conclusão do ensaio pode ser descrito em quatro fases, identificadas na Fig. 9.

O padrão de fendilhação na rotura está apresentado na Fig. 10 a). A Fig. 10 b) apresenta uma das categorias de modo de rotura para painéis, apresentadas por Mehrabi et al.[3], na qual se inclui o padrão de fendilhação detectado.

Na primeira fase do comportamento todos os elementos que constituem o painel funcionam solidariamente. A entrada em regime não linear (fase 2) inicia-se, em ambos os sentidos, para deslocamento relativo (*drift*) na ordem dos 0.02-0.025%. Está associada à ocorrência de: 1) deslizamento por corte nas juntas verticais, entre os topos dos pilares e a alvenaria; 2) o destacamento por tracção da junta vertical, entre o topo do pilar e a alvenaria, a jusante do sentido da aplicação de carga; 3) o deslizamento da junta horizontal entre a viga de topo e a alvenaria; 4) o início de esmagamento, nos cantos da junta horizontal entre a viga de topo e a alvenaria; 5) o início do aparecimento de fissuras na alvenaria; 6) o desenvolvimento de uma fenda diagonal no nó de ligação entre o topo do pilar e a viga, a montante do sentido de aplicação da carga. O pico de resistência (fase 3) é alcançado imediatamente antes do esmagamento da interface/alvenaria nos topos dos pilares. O último troço (fase 4), por ter sido interrompido antes do colapso do painel, foi caracterizado apenas pela evolução da degradação dos materiais, identificada imediatamente após ser atingido o pico de resistência. O padrão de fendilhação do painel no final do ensaio aponta para um modo de rotura semelhante aos incluídos na categoria E, dos apresentados por Mehrabi, et al. [3](ver Fig. 10 -b).

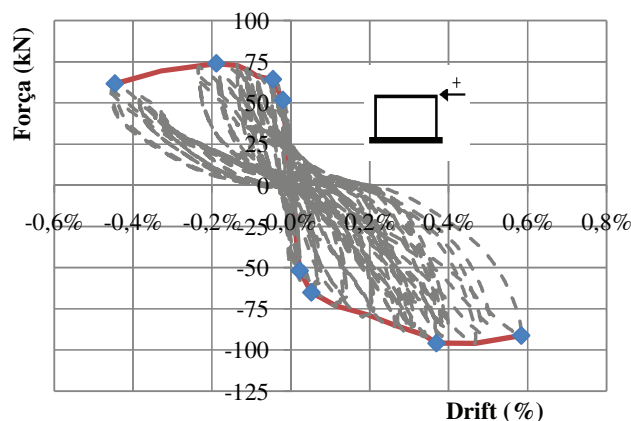


Figura 9 – Resultados e envolvente experimental

O sentido da aplicação de carga teve influência no nível de resistência mobilizado e no *drift* para o qual ocorreu. A resistência máxima é de 96.1 kN e a mínima de 73.9kN e ocorre para *drift* de 0.37% e 0.19%, respectivamente. O sentido que mobilizou menor resistência corresponde àquele em que, em termos de processo construtivo, a zona de fecho da alvenaria fica a montante do sentido de carga. O

esmagamento da interface/tijolo na ligação ao topo do pilar ocorreu, nesta zona do painel, para nível de carga inferior ao que se verificou quando o sentido de carga provoca o esmagamento da interface a partir da qual se inicia, em termos de processo construtivo, a construção da parede de alvenaria. O processo construtivo, além das características mecânicas dos materiais, conduz, desta forma, a diferenças significativas no nível de resistência e ductilidade dos painéis.

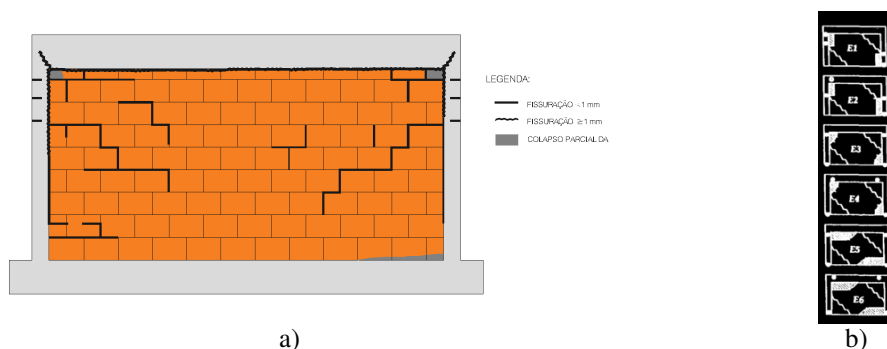


Figura 10 – Padrão de fendilhação: a) Padrão de fendilhação do painel testado; b) modos de rotura de referência – Categoria E – de acordo com Mehrabi, et al. [3]

O comportamento experimental do painel foi comparado com o do modelo numérico de um pórtico de betão armado não preenchido. Os resultados estão apresentados na Fig. 11. O dimensionamento realizado no Eurocódigo 8 [2] impõe níveis de drift entre pisos, para construções do tipo da estudada, da ordem dos 0.5%. A comparação entre o comportamento do painel e o numérico do pórtico revelam duas informações importantes: 1) o painel é capaz de mobilizar uma resistência a acções horizontais muito superior à do pórtico não preenchido; 2) para o nível de drift previsto no Eurocódigo 8 a influência da alvenaria é ainda significativa, conferindo ao painel uma rigidez muito superior à do pórtico isolado. Este último facto contrapõe-se à prática corrente de projecto, que consiste em desprezar a influência das alvenarias no contributo para a resistência e período de vibração dos edifícios na análise sísmica. Se o desprezo da resistência adicional pode ser considerado conservativo, a maior rigidez pode conduzir a uma estimativa por defeito na quantificação da acção sísmica.

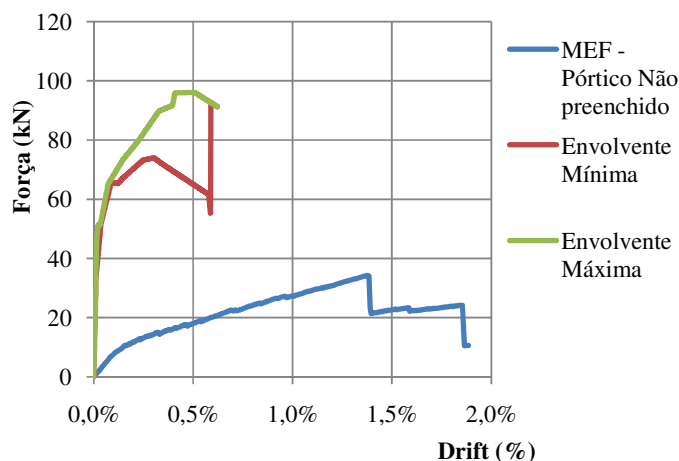


Figura 11 – Comparação do comportamento experimental do painel com o do modelo numérico de um pórtico de betão armado não preenchido

#### 4.2 Para fora do plano

Após ter sido introduzido dano na parede pela realização do ensaio no plano, foi efectuado o ensaio para fora do plano, de acordo com o esquema de ensaio anteriormente descrito.

O dano introduzido pelo ensaio no plano, nomeadamente a fissuração introduzida ao longo do interface de ligação entre o tijolo e os elementos de betão, alterou de uma forma substancial as condições de apoio da alvenaria.

O ensaio para fora do plano foi dividido em quatro ciclos de deslocamentos imprimidos ao painel. Cada ciclo  $i$ , era composto por dois procedimentos de deslocamento pré-definido, aplicados, cada um, por um dos actuadores, correspondendo aos procedimentos  $i$  e  $i+1$ . A velocidade dos incrementos de deslocamentos durante o ensaio foi de 0.10 mm/s.

Os valores de deslocamentos alvos para cada ciclo foram de 10 mm, 25 mm, 50 mm e 100 mm respectivamente para o ciclo 1, 2, 3 e 4. Contudo devido às condicionantes do esquema de ensaio, nomeadamente à grande deformabilidade dos “airbags” e folgas no mecanismo, esses valores não foram atingidos em cada ciclo.

As medições efectuadas dos deslocamentos em função da força aplicada, do ponto médio do painel encontram-se discriminados na Fig. 12, onde é possível observar os diferentes ciclos que caracterizaram este ensaio.

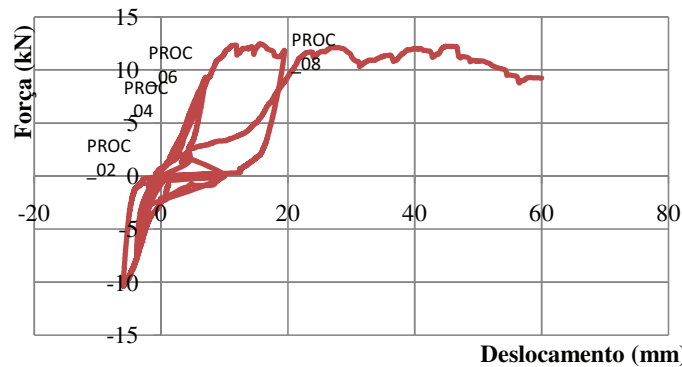


Figura 12 - Resultados força vs deslocamento do ensaio para fora do plano

É possível identificar um comportamento quase elástico nos ciclos 1 e 2, onde nos procedimentos 2 e 4 obtemos os deslocamentos de 3,83 mm e 7,02 mm, respectivamente. No procedimento 4, no gráfico força vs deslocamento, verifica-se um andamento quase sobreposto ao do procedimento 2, consequência da sua rigidez não ter sido alterada. No procedimento 6 do ciclo 3, constata-se o aparecimento de um patamar plástico, onde o deslocamento só é recuperado pela acção externa dos actuadores, dado tratar-se de um ensaio cíclico em dois sentidos. No procedimento final existe uma grande diminuição da rigidez, como pode ser verificada pela inclinação do gráfico, tendo-se manifestado um enorme patamar plástico antes do colapso final para fora do plano do painel de alvenaria.

A Fig. 13 apresenta o mapa de fendas que a parede apresentava no final do ensaio. A parte superior da parede apresentava uma grande percentagem de unidades com colapso total ou parcial, resultante do facto da parede ter sido expulsa do plano do pórtico envolvente como pode ser constatado na sua fase intermédia na Fig. 14 – a) e na fase final, na Fig. 14 – b), onde podemos observar a expulsão completa do painel de alvenaria para fora do plano. Os interfaces laterais foram completamente esmagados, o que desligou completamente a parede da estrutura de betão armado envolvente. É evidente que estas duas situações foram altamente potenciadas pelo padrão de fendilhação ocorrido no ensaio no plano. Com o evoluir do esmagamento das ligações laterais e de topo, com o conseqüente colapso das unidades na fase final do ensaio, a parede teria adquirido um comportamento de consola, tendo originado o padrão de fendilhação patenteado na sua base, que terá certamente a sua justificação em ter sido ultrapassado o momento resistente na direcção em questão.



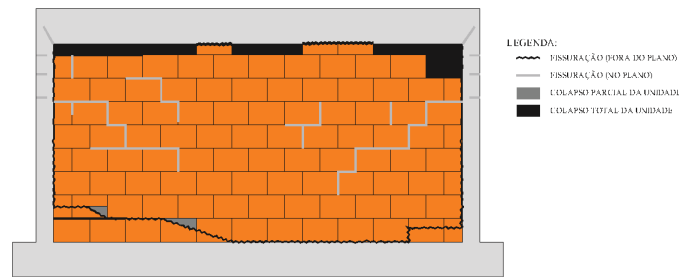


Figura 13 – Mapa de fendas resultantes do ensaio para fora do plano

Foi desenvolvido um modelo de elementos finitos considerando um esquema estrutural, onde o pórtico envolvente foi substituído por “apoios”, assimilado a uma laje apoiada em quatro bordos: no bordo inferior foram restringidos os deslocamentos horizontais e verticais; nos bordos laterais e superior, dado o esmagamento das juntas de interface, os deslocamentos a obter foram condicionados, mediante a introdução de apoios “mola” que restringissem o deslocamento horizontal em função da rigidez da ligação, calibrada a partir dos resultados disponíveis no ensaio. Os resultados numéricos, mediante a modelação efectuada parecem confirmar os valores experimentais, como se pode constatar nos valores obtidos para um ponto médio do painel (Fig. 15).



Figura 14 – Movimento da parede para fora do plano: a) Fase intermédia do ensaio; b) Separação completa do painel de alvenaria do pórtico de betão armado

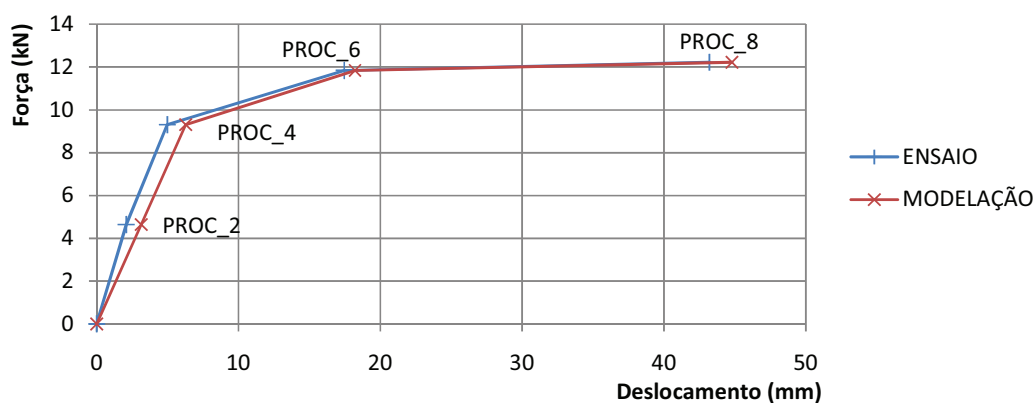


Figura 15 – Força vs deslocamento – Ponto médio do painel

## 5. CONCLUSÕES

O processo construtivo, além das próprias características mecânicas dos materiais incluídos no painel, conduz a diferenças significativas no nível de resistência e ductilidade dos painéis.

Comportamento a acções perpendiculares ao plano, de alvenaria de enchimento com dano prévio

No ensaio no plano as interfaces são as principais responsáveis pela entrada do painel em regime não linear. O nível de dano no painel, para o *drift* de dimensionamento, não permite o desprezo da sua influência, quer na capacidade resistente do pórtico, quer na sua rigidez.

No ensaio no plano o comportamento experimental do painel comparado com o do modelo numérico de um pórtico de betão armado não preenchido, revela duas informações importantes: 1) o painel é capaz de mobilizar uma resistência a acções horizontais muito superior à do pórtico não preenchido; 2) para o nível de *drift* previsto no Eurocódigo 8 [2] a influência da alvenaria é ainda significativa, conferindo ao painel uma rigidez muito superior à do pórtico isolado.

No ensaio fora do plano, o dano introduzido pelo ensaio no plano, nomeadamente a fissuração introduzida ao longo do interface de ligação entre o tijolo e os elementos de betão, alterou de uma forma substancial as condições de apoio da alvenaria. O esmagamento verificado nas juntas verticais, aquando do ensaio no plano parece ter prejudicado a mobilização do efeito de arco entre os apoios laterais e, conseqüentemente, o desenvolvimento de um modo de rotura condizente com um esquema estrutural de um painel apoiado em três bordos, que seria espectável, em detrimento do que se veio a verificar, um esquema estrutural de um painel em consola.

No ensaio fora do plano é possível evidenciar três fases no ensaio: 1) A primeira fase, entre o início do ensaio e o final do procedimento 4, evidencia um comportamento elástico e atinge um *drift* máximo de 0.41%. O esquema estrutural do painel, assemelha-se a um corpo em consola, embora mobilizando lateralmente e superiormente algum efeito residual de apoio elástico; 2) A segunda fase, entre os procedimentos 4 e 6, atinge o valor da força máxima, passa a ter um comportamento plástico, onde o ciclo de descarga apresenta um grande desfasamento do ciclo de carga e atinge um *drift* máximo de 1.15%. O esquema estrutural do painel, assemelha-se a um corpo em consola, embora mobilizando lateralmente e superiormente algum efeito residual de apoio elástico, tendendo a sua rigidez para o valor nulo; 3) A fase final, entre o procedimento 6 e o colapso final para fora do plano do painel de alvenaria, apresenta um comportamento que evidencia a perda das ligações superiores e laterais. A rotura ocorreu por flexão, na zona inferior da parede, o que deixa antever uma rotação de corpo rígido. No ensaio fora do plano comportamento experimental do painel quando comparado com o do modelo numérico é muito semelhante em termos de deslocamentos.

## REFERÊNCIAS

[1] CALVI, G. M.; BOLOGNINI, D.; PENNA, A.- Seismic Performance of Masonry-infilled R. C. Frames: Benefits of Slight Reinforcements: Sísmica 2004 - 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica. 2004.

[2] CEN- Eurocódigo 8, EN 1998-1: Projecto de estruturas para resistência aos sismos Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios (2009)

[3] MEHRABI, ARMIN B., [et al.]- Experimental Evaluation of Masonry-Infilled RC Frames. Journal of Structural Engineering. Vol. 122, n.º 3 (1996), p.228-228.