

## ENSAIOS SÍSMICOS INOVADORES DE PÓRTICOS COM PAREDES DE ENCHIMENTO EM ALVENARIA



António A. Correia\*

Bolseiro Pós-Dout.  
LNEC – DE/NESDE  
Lisboa, Portugal  
aacorreia@lnec.pt



Alfredo Campos Costa

Investigador Principal  
LNEC – DE/NESDE  
Lisboa, Portugal  
alf@lnec.pt



Paulo X. Candeias

Inv. Auxiliar Conv.  
LNEC – DE/NESDE  
Lisboa, Portugal  
pcandeias@lnec.pt



Paulo B. Lourenço

Prof. Catedrático  
Univ. Minho  
Guimarães, Portugal  
pbl@civil.uminho.pt

### SUMÁRIO

Foi recentemente desenvolvido no LNEC um dispositivo e uma metodologia experimentais para a realização de ensaios sísmicos em paredes de alvenaria de enchimento inseridas em pórticos de betão armado, representativos do comportamento de um painel de parede num edifício submetido a uma solicitação sísmica bidireccional. Para esse fim, a base do pórtico a ensaiar é fixa à mesa sísmica e a viga superior é ligada a uma parede de reacção. O movimento da mesa na direcção do plano da parede implica dessa forma a imposição de uma deformação relativa, dinâmica, entre o topo e a base do pórtico. Ao mesmo tempo, uma estrutura auxiliar garante que o movimento dinâmico da mesa, na direcção perpendicular, é imposto como um movimento de corpo rígido ao pórtico, deixando a parede em vibração forçada devido às forças de inércia que se desenvolvem para fora do seu plano.

**Palavras-chave:** Mesa sísmica, Pórtico, Betão armado, Alvenaria, Reforço.

### 1. INTRODUÇÃO

A actividade sísmica recente na Europa tem demonstrado que as paredes de alvenaria de enchimento são particularmente vulneráveis a colapsos para fora do plano após terem sido

danificadas no seu próprio plano, sendo igualmente importante quantificar em que medida as acelerações perpendiculares ao plano de alvenaria fragilizam o comportamento do mesmo no seu plano. Para a caracterização da sua resposta estrutural face à acção sísmica, é necessária uma actividade experimental intensa que permita a avaliação da eficiência de técnicas construtivas, a validação de estratégias de reforço estrutural, assim como o desenvolvimento e calibração de modelos de comportamento mecânico.

Refira-se a este propósito que uma das técnicas de reforço amplamente utilizadas em edifícios construídos em épocas anteriores à entrada em vigor da moderna regulamentação sísmo-resistente consiste, justamente, no reforço de alguns ou todos os panos de alvenaria dos pórticos de betão armado de fraca resistência e reduzida capacidade dúctil a acções horizontais. Importa portanto caracterizar de forma adequada a fenomenologia complexa da interacção pórtico-painel de alvenaria para situações experimentais próximas das reais e avaliar em que medida essas técnicas de reforço poderão vir a ser realmente eficazes para diferentes níveis de intensidade da acção sísmica.

Por outro lado, a construção, transporte e ensaio de modelos de grandes dimensões numa plataforma sísmica é, naturalmente, uma actividade dispendiosa que deve ser criteriosamente planeada e executada. Acresce que a natureza destrutiva desta actividade experimental implica a não-repetibilidade de uma qualquer fase dos ensaios. Por estas razões, torna-se então importante a realização de ensaios em subestruturas de menores dimensões, que representem uma componente importante do comportamento da estrutura que se pretende simular. Estes ensaios apresentam a grande vantagem de serem mais económicos e, como tal, permitirem a replicação dos modelos e a repetibilidade dos ensaios. Por sua vez, esta repetibilidade leva a uma mais fiável interpretação dos ensaios ao permitir a quantificação e tratamento estatístico das incertezas na resposta estrutural.

A subestruturação implica, no entanto, a existência de algumas condições em termos de infraestrutura laboratorial por forma a garantir que as condições de fronteira da subestrutura são respeitadas de forma adequada. Mais especificamente, torna-se necessário que hajam estruturas de reacção, acopladas a actuadores adicionais, que permitam simular o efeito da restante estrutura sobre o modelo a ensaiar. A plataforma de ensaios sísmicos do LNEC tem pois uma configuração ideal para este tipo de ensaios devido à existência de três paredes de reacção adjacentes à mesa sísmica [1].

Por essas razões, desenvolveu-se recentemente uma metodologia e um dispositivo experimental inovadores para a realização de ensaios em mesa sísmica de painéis de alvenaria, estrutural ou não, simultaneamente solicitados no seu plano e na perpendicular ao seu plano. A sua aplicação prática está a decorrer através de uma campanha experimental, financiada através do projecto europeu SERIES [2], que envolve o ensaio de modelos à escala real de pórticos em betão armado com paredes de alvenaria de enchimento, e com diferentes tipos de reforços estruturais compatíveis com as disposições do Eurocódigo 8 [3].

O dispositivo experimental, em conjunto com a mesa sísmica e as paredes de reacção

adjacentes, permite que sejam impostos simultaneamente a esses modelos: (i) um movimento dinâmico, no seu plano, correspondente a uma história de deslocamentos entre pisos de um edifício a um certo nível; (ii) uma vibração de corpo rígido, para fora do plano, do pórtico em betão armado, que reproduza as acelerações absolutas naquele mesmo nível do edifício em causa, dessa forma induzindo vibrações locais no pano de alvenaria.

## 2. ENSAIOS SÍSMICOS INOVADORES: DISPOSITIVO E METODOLOGIA

Com base na análise da literatura, verificou-se que raramente foram realizados ensaios em que se apliquem solicitações simultaneamente no plano da parede e para fora do seu plano (e.g., [4-7]). Este é um inconveniente óbvio dos ensaios anteriores visto que a acção sísmica nunca actua isoladamente numa direcção. Por outro lado, apenas no trabalho de Komarane-ni [8], que utiliza modelos à escala reduzida 1:2, a acção para fora do plano é uma acção sísmica realista, enquanto que todos os outros autores utilizam ou forças impulsivas através de “airbags” ou forças cíclicas. Estas não são claramente representativas das forças de inércia que se desenvolvem no pano de alvenaria aquando de um sismo. Finalmente, a solicitação no plano da parede correspondeu sempre a uma acção cíclica e não dinâmica.

Tendo em conta o acima referido, e as especificidades das instalações de ensaios sísmicos do LNEC, foi então desenvolvido um dispositivo de ensaio inovador denominado por “Testing device for Innovative Masonry infills” (TIM). Este dispositivo permite ultrapassar todos os inconvenientes referidos. De facto, utilizando o conceito de subestruturação referido anteriormente e utilizando simultaneamente a mesa sísmica triaxial e uma das paredes de reacção do LNEC, é possível realizar ensaios à escala real em que tanto a acção no plano como a acção para fora do plano da parede são dinâmicas, simultâneas e representativas de uma acção sísmica realista. O dispositivo e a metodologia de ensaio desenvolvidos pretendem simular a resposta sísmica de uma subestrutura representativa de um edifício em betão armado com paredes de enchimento em alvenaria. Dessa forma, como ilustrado na Fig. 1, o ensaio utiliza um pórtico em quadro fechado preenchido com alvenaria de tijolo furado tradicional e rebocado, podendo ter ou não reforços adicionais.

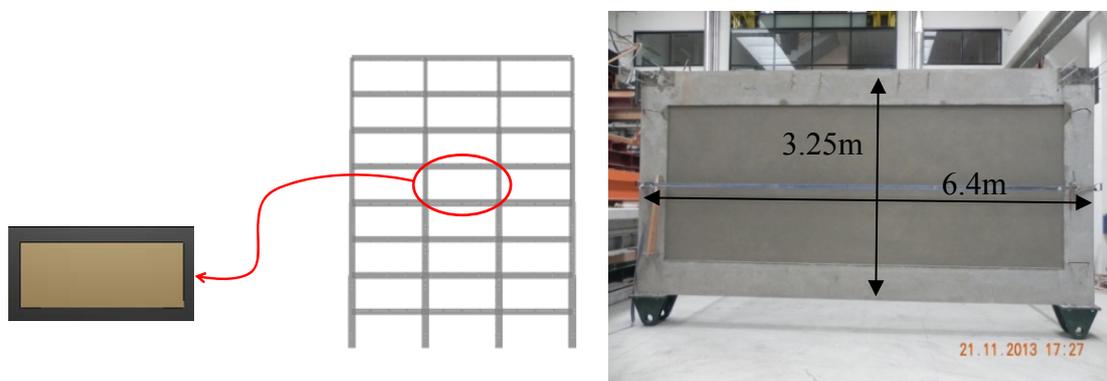


Figura 1. Painel representativo de um edifício em betão armado, porticado e com paredes de enchimento em alvenaria: representação esquemática (esq.); modelo à escala real (dir.).

## 2.1 Dispositivo de ensaio

A Fig. 2 representa uma vista global do dispositivo de ensaio inovador idealizado neste trabalho. Por forma a garantir as condições de fronteira adequadas, os nós pilar/viga na base do pórtico encontram-se apoiados em rótulas cilíndricas que permitem a rotação no plano da parede, rotação esta também permitida nos nós superiores. Estas rótulas são apoiadas numa viga metálica que assegura a ligação à mesa sísmica e permite ensaiar pórticos com vãos diferentes, entre os 4.5 m e os 6.0 m. Ainda no que se refere ao comportamento no plano da parede, a viga superior do pórtico encontra-se ligada por uma escora, de muito elevada rigidez, à parede de reacção adjacente à mesa sísmica, ficando assim a viga impedida de se mover longitudinalmente. Uma estrutura piramidal assegura a distribuição da carga na escora para uma superfície considerável da parede de reacção.

Quando a mesa sísmica se move na direcção longitudinal, desenvolve-se então um deslocamento relativo entre a viga superior e a viga inferior do pórtico, representativo do que sucede entre os pisos de um edifício sob a acção sísmica. Consequentemente, dado que a viga superior fica sujeita alternativamente a esforços de compressão e tracção significativos (transmitidos pela escora à parede de reacção), é-lhe aplicado um pré-esforço central que não altera o seu comportamento no pórtico e lhe permite suportar essa carga axial.

Por outro lado, os pilares do pórtico são também pré-esforçados de forma a assegurar uma compressão correspondente ao peso dos pisos superiores do edifício. Os pórticos ensaiados no âmbito do projecto europeu SERIES [2] têm dimensões ao eixo das peças de 6.0 m na direcção longitudinal e de 2.75 m na vertical, com vigas de secção transversal de 0.5 m x 0.4 m e pilares de 0.4 m x 0.4 m, betão C25/30 e aço A500NR. As curvas monotónicas força lateral-deslocamento, do pórtico sem parede e obtidas por simulação numérica com o programa de análise não linear SeismoStruct [9], são as apresentadas na Fig. 3. Como se pode verificar, o comportamento é semelhante quer a força lateral aplicada à viga superior seja de compressão quer seja de tracção.



Figura 2. Representação global do dispositivo de ensaio.

Naturalmente que a consideração da contribuição da parede, com tijolo furado tradicional 30x20x22, ligado e rebocado com argamassa da classe de resistência M5, para a resistência do pórtico a deformações no seu próprio plano levaria a uma resposta bastante mais rígida na sua fase inicial, estimando-se uma carga máxima de cerca de 370 kN para um deslocamento de cerca de 2 mm e seguida de uma curva ligeiramente decrescente até a contribuição da parede se tornar irrelevante.

No que respeita ao comportamento para fora do plano, foi concebida uma estrutura porticada tridimensional, com os elementos em caixão metálico, que se movimenta com a mesa sísmica como um corpo rígido. Esta estrutura metálica, de elevada rigidez e resistência, é aparafusada na sua base directamente à mesa sísmica e serve de apoio à viga superior do pórtico a ensaiar. Esta última ligação é portanto fixa na direcção transversal mas livre na direcção longitudinal através de um sistema de rolamentos. Dessa forma, a estrutura metálica não interfere com a resposta do pórtico no seu próprio plano. Relativamente à resposta do pórtico para fora do plano, a estrutura metálica deve ter uma elevada rigidez de forma a assegurar que as vigas inferior e superior têm o mesmo movimento quando a mesa sísmica vibra transversalmente, ficando apenas o painel da parede de enchimento em vibração forçada devido às forças de inércia que nele se desenvolvem, como pretendido. Para tal, o dimensionamento da estrutura metálica foi condicionado pela sua rigidez transversal, garantindo que o 1º modo de vibração na direcção transversal tivesse uma frequência própria superior a 20 Hz. Essa análise paramétrica foi realizada no programa de cálculo SAP2000 [10], cujos modelos se apresentam na Fig. 4.

Os modos e as respectivas frequências de vibração, em base rígida, encontram-se representados nas Figs. 5 e 6. O facto de o modo de vibração na direcção transversal, considerando a massa e a rigidez do pórtico e da parede, ser de cerca de 23 Hz garante que não haverá influência da vibração da estrutura metálica nos modos de vibração locais da parede para fora do seu plano quando esta estiver danificada no seu próprio plano. Garante ainda que o movimento do pórtico em betão armado na direcção transversal será um movimento de corpo rígido, havendo deformação significativa apenas do pano de alvenaria.

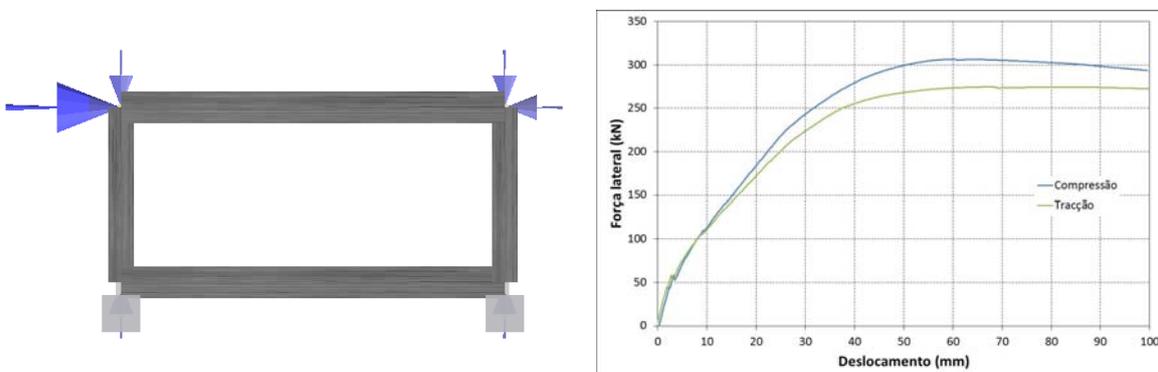


Figura 3. Modelo de análise para a resposta do pórtico sem parede e correspondentes curvas força lateral-deslocamento.

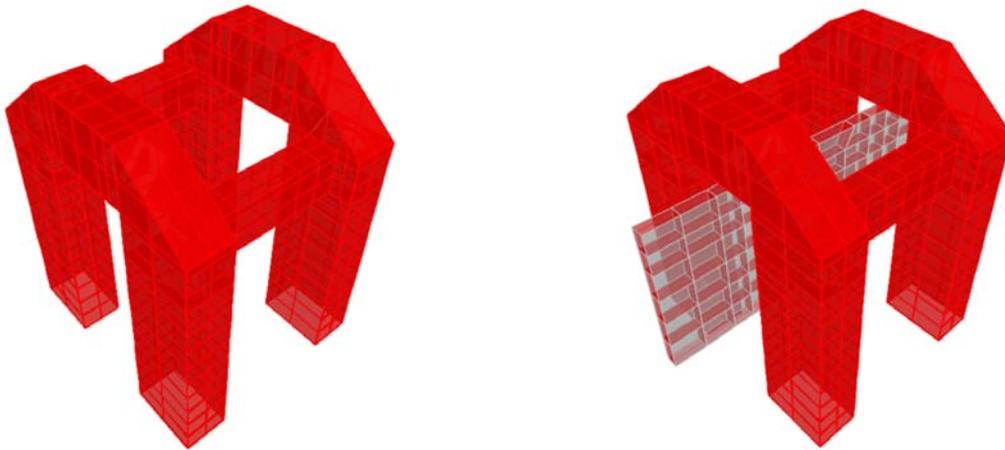


Figura 4. Representação esquemática dos modelos utilizados para o dimensionamento da estrutura metálica auxiliar considerando (dir.) ou não (esq.) o pórtico e a parede.

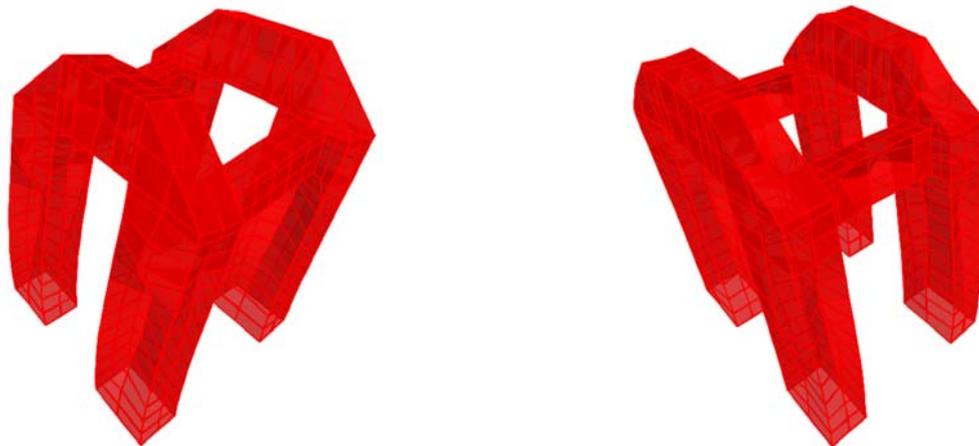


Figura 5. Modos de vibração da estrutura metálica auxiliar não considerando a contribuição do pórtico: longitudinal –  $f = 19.9$  Hz (esq.); transversal –  $f = 33.8$  Hz (dir.).

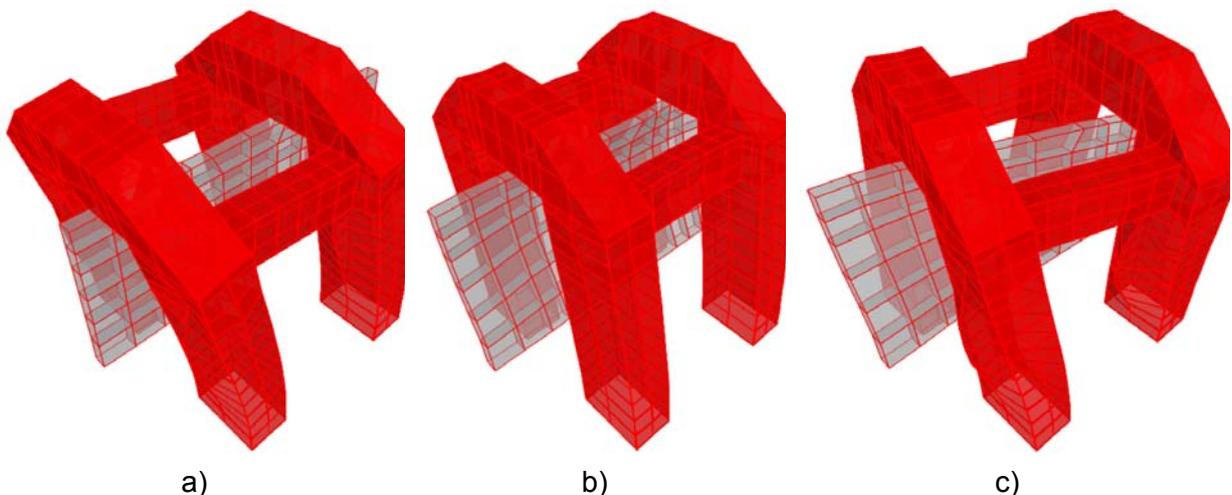


Figura 6. Modos de vibração da estrutura metálica auxiliar considerando a contribuição do pórtico: a) longitudinal –  $f = 18.4$  Hz; b) transversal –  $f = 23.1$  Hz; c) torção –  $f = 25.5$  Hz.

## 2.2 Metodologia de ensaio

Os movimentos sísmicos a considerar nas duas direcções horizontais dependem do edifício que se pretende simular (geometria, materiais, localização, solo de fundação, etc.). Em termos gerais, pode afirmar-se que tanto o movimento no plano da parede como o movimento para fora do plano da parede devem corresponder ao movimento do piso considerado e devem ter um conteúdo em frequência de banda estreita. De facto, o movimento no plano da parede, que simula o deslocamento relativo entre pisos, será maioritariamente condicionado pelos modos de vibração correspondentes às frequências de vibração mais reduzidas. Por outro lado, as frequências de vibração associadas às forças de inércia perpendiculares ao painel de alvenaria e representativas dos seus modos de vibração locais corresponderão a frequências bastante mais elevadas e estarão associadas às acelerações absolutas sentidas ao nível do piso em estudo.

O cenário sísmico considerado neste trabalho simula um sismo tipo 1 do Eurocódigo 8 [3], correspondente a um sismo de elevada magnitude e a grande distância, para a zona sísmica de Lisboa (zona 1.3) e para um terreno rochoso (solo tipo A). A aceleração máxima à superfície do terreno, para uma vida útil de 50 anos e para um período de retorno de referência igual a 475 anos, ou seja, correspondendo ao requisito de não ocorrência de colapso, é então igual a  $1.5 \text{ m/s}^2$ . Foram geradas duas componentes não correlacionadas da acção sísmica, para as direcções longitudinal e transversal, com aproximadamente os mesmos valores de pico da aceleração absoluta e da velocidade e deslocamento relativos. Estes sinais foram gerados e adaptados, de forma a terem um espectro de resposta de pseudo-aceleração semelhante ao regulamentar (ver Fig. 7). A duração da fase intensa do sismo é de cerca de 30 s. O movimento dinâmico a aplicar à mesa sísmica não é ainda esta acção sísmica, mas corresponde ao efeito desta ao nível do piso considerado na subestrutura em análise, conforme já explicado.

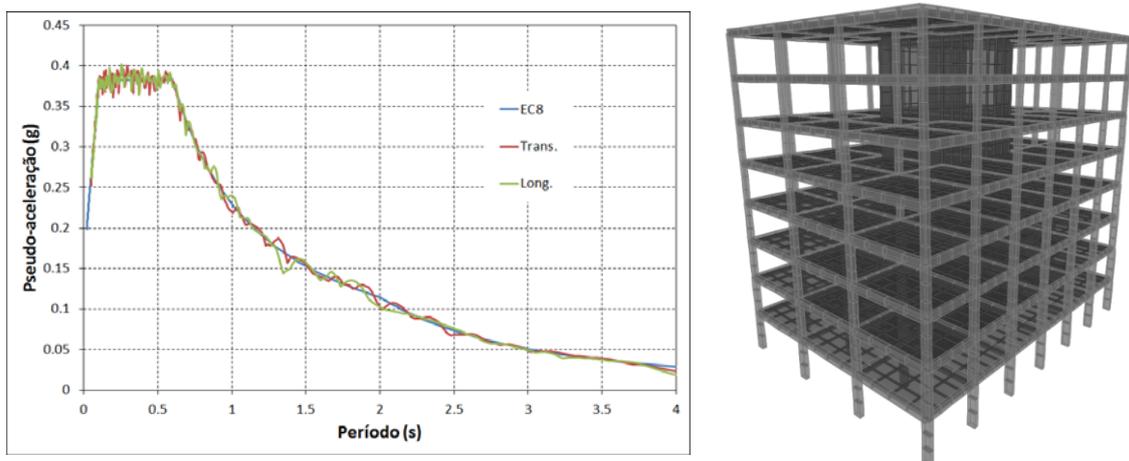


Figura 7. Espectros de resposta de pseudo-aceleração para um amortecimento de 5% (esq.) e modelo de um edifício representativo (dir.) para a definição das histórias de deslocamentos e acelerações a aplicar à subestrutura.

A acção sísmica ao nível do solo foi aplicada a um modelo numérico de um edifício representativo (ver Fig. 7), de forma a obter as histórias de deslocamento relativo entre pisos (*interstorey drift*) – acção no plano – e de acelerações absolutas – acção para fora do plano – para um painel porticado situado no 4º piso. As acções obtidas para aplicação à subestrutura a ensaiar encontram-se representadas na Fig. 8.

Finalmente, o procedimento de ensaio inclui a aplicação de vários níveis da acção sísmica, sendo que entre cada patamar a estrutura é: i) observada visualmente; ii) as fendas e a sua evolução são documentadas; iii) é realizada uma identificação dinâmica da estrutura para determinação da degradação das suas propriedades em termos de rigidez (modos e frequências de vibração) e o aumento da sua capacidade de dissipação de energia. São ainda realizados, entre cada patamar, ciclos de carga no plano da estrutura para caracterização da sua resposta, conduzidos abaixo de um limite correspondente ao deslocamento máximo atingido durante o ensaio dinâmico. Os patamares de acção sísmica considerados são apresentados no Quadro 1, sendo que a acção sísmica acima descrita corresponde ao nível de referência, ou seja, assume um factor de escala de 100%.

Quadro 1. Patamares da acção sísmica.

Nível	Período de retorno	Probab. de excedência	Factor de escala
1	-	-	10%
2	72 anos	50%	34%
3	224	20%	63%
4	475	10%	100%
5	975	5%	159%
6	2475	2%	292%
7	4975	1%	464%

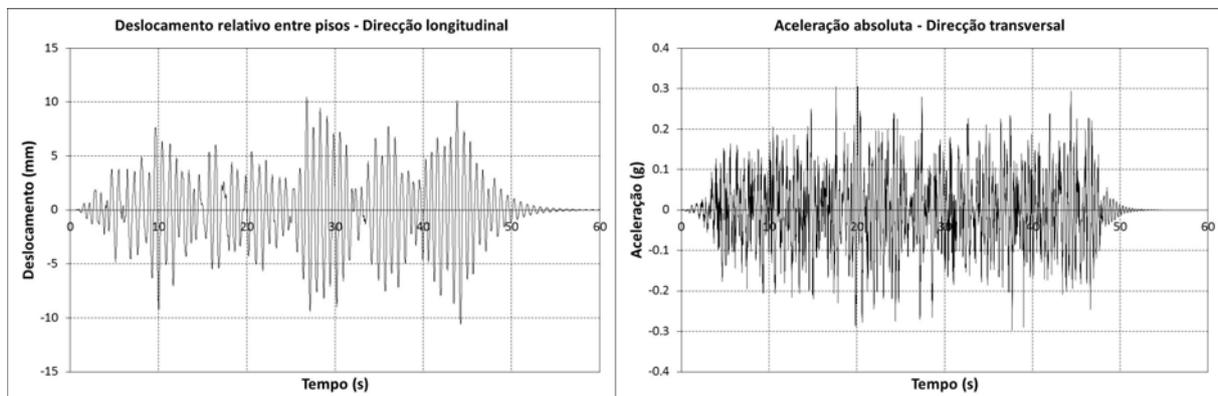


Figura 8. Histórias de deslocamentos e acelerações a aplicar à subestrutura, no seu plano (direcção longitudinal) e para fora do plano (direcção transversal).

Relativamente à aquisição de dados durante os ensaios, toda a informação recolhida permite não só controlar o andamento dos ensaios e a tomada de decisões em tempo real, como uma análise rigorosa dos resultados obtidos, a realizar posteriormente. A instrumentação é constituída por:

- i) 22 acelerómetros para monitorização do comportamento do pórtico e da parede para fora do plano e 2 acelerómetros para a resposta no plano;
- ii) 11 acelerómetros na estrutura metálica da TIM para a sua caracterização dinâmica;
- iii) 2 transdutores de deslocamento para medição da deformação por corte do painel de parede no seu plano;
- iv) 6 dispositivos ópticos de detecção do movimento 2D dos nós do pórtico e 1 sistema óptico de detecção do movimento 3D de até 26 pontos da estrutura, com base no movimento de LEDs;
- v) 1 dispositivo fotográfico para aquisição de imagens a elevada velocidade, a serem posteriormente analisadas por videocorrelação, para medição da deformação no plano de um nó do pórtico;
- vi) 1 célula de carga para medição da força transmitida pela escora entre a viga superior do pórtico e a parede de reacção;
- vii) 3 acelerómetros e 3 transdutores de deslocamento instalados na mesa/actuadores para utilização no sistema digital de controlo do seu movimento;
- viii) 7 acelerómetros colocados na superfície da plataforma sísmica para a caracterização completa do seu movimento de corpo rígido.

### 2.3 Exemplo de aplicação

O dispositivo de ensaio foi idealizado por forma a conceder a maior flexibilidade possível na definição da geometria e pormenorização dos painéis de alvenaria a serem ensaiados. Dessa forma, como já referido, o dispositivo de ensaio pode ser facilmente convertido para testes com outras dimensões e para paredes constituídas por outro tipo de alvenarias ou mesmo outro tipo de materiais.

No âmbito do projecto SERIES [2], os pórticos ensaiados têm as dimensões referidas na secção 2.1. Foram definidos três tipos de paredes de alvenaria a ensaiar, sendo apresentados pormenores nos desenhos de dimensionamento em anexo:

- i) Parede tradicional sem reforços;
- ii) Parede tradicional reforçada com armaduras em forma de treliça (Bekaert Murfor RND/Z-5-200), a aplicar nas juntas horizontais e a ancorar no pórtico;
- iii) Parede tradicional reforçada com malhas metálicas colocadas pelo exterior das paredes (Bekaert Armanet  $\phi 1.05\text{mm}$  12.7x12.7mm). Esta malha fica embebida na camada de reboco e é pregada à alvenaria e aos elementos do pórtico.

As Figs. 9 a 14 representam as fases construtivas dos modelos executados e dos reforços adoptados. Note-se que são visíveis chapas metálicas no exterior dos nós do pórtico que

assumem uma dupla função. A primeira é que servem de ancoragem às armaduras longitudinais dos pilares e vigas, as quais se encontram soldadas a essas chapas com o intuito de garantir que estas apresentam um comportamento semelhante às armaduras contínuas dos nós de pórticos de edifícios. A segunda função é a de permitir a ligação aparafusada às rótulas da base e à escora horizontal. Assumem também um papel importante no confinamento e distribuição da carga das ancoragens de pré-esforço.



Figura 9. Pormenorização das armaduras visível antes da betonagem.



Figura 10. Pormenores das rótulas na base e da aplicação do pré-esforço.



Figura 11. Pórtico preparado para a construção da parede de enchimento.

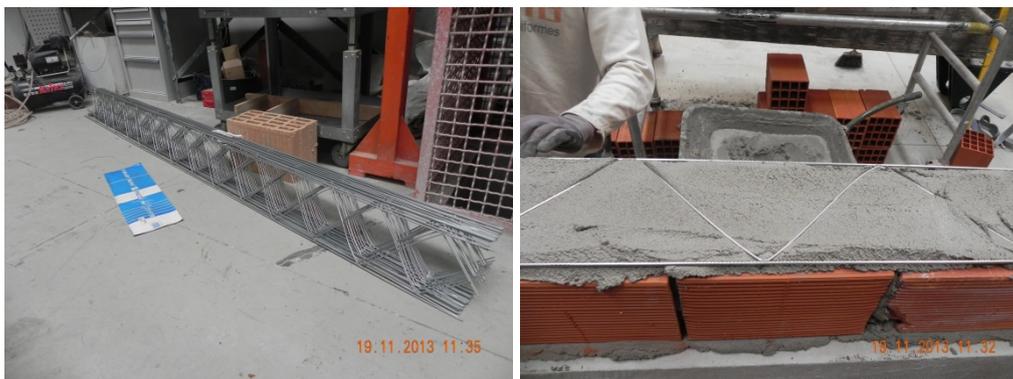


Figura 12. Construção da parede de alvenaria reforçada com armaduras na junta horizontal (Bekaert Murfor RND/Z-5-200).



Figura 13. Modelos preparados para serem ensaiados.

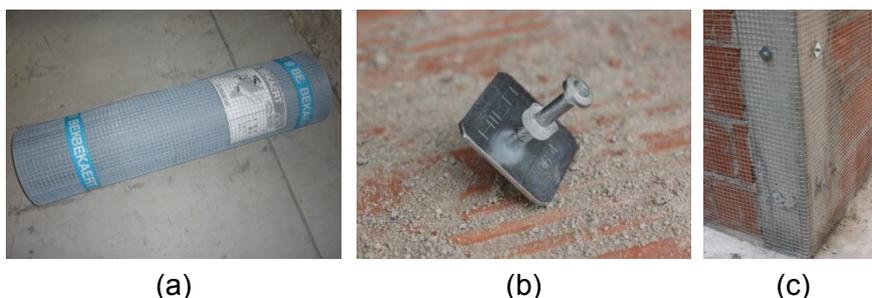


Figura 14. Pormenores do reforço com malha metálica e sua aplicação (Bekaert Armanet  $\phi 1.05\text{mm } 12.7 \times 12.7\text{mm}$ ).

Apresentam-se de seguida algumas imagens da montagem do dispositivo de ensaio para o primeiro teste realizado (Figs. 15 a 18). Até ao momento foram ensaiados dois modelos de parede tradicional sem reforços, estando ainda a ser tratados os resultados dos ensaios. No ensaio inicial o movimento longitudinal imposto na mesa traduziu-se por um deslocamento relativo no pórtico desprezável, dadas as deformabilidades e folgas existentes nas componentes do sistema para o movimento no plano do pórtico. O mecanismo formado no modelo foi, por essa razão, o correspondente a um colapso para fora do plano solicitado pelas acelerações transversais. Este mecanismo, que se formou no nível 3 da acção sísmica (63% do nível de referência), correspondeu ao aparecimento de uma fenda vertical

a meio vão da parede, seguido de uma fenda horizontal a meia altura, não se verificando dano prévio no próprio plano (Fig. 19). O esmagamento dos cantos da parede devido ao movimento longitudinal ocorreu apenas para os níveis mais elevados da acção sísmica (5 e 6).



Figura 15. Montagem final dos componentes da TIM sobre a plataforma sísmica.



Figura 16. Suportes rotulados na base e pirâmide de ligação à parede de reacção.



Figura 17. Posicionamento da TIM em redor do modelo a ensaiar.



Figura 18. Montagem de ensaio completa.



Formação de fendas devido à aceleração transversal (acima);

Mecanismo final com destruição generalizada da periferia da parede (ao lado).

Figura 19. Evolução do dano observado no modelo inicial.

Para o segundo ensaio foram corrigidas as deformabilidades do sistema evidenciadas no ensaio inicial. Dessa forma, deu-se a formação de um mecanismo de rotura no plano da parede, constituído maioritariamente por uma fenda horizontal a 1/3 de altura com ramificações diagonais para os cantos da parede (ver Fig. 20). A evolução desse

mecanismo consistiu na formação de novas fendas horizontais acima da inicial e extensão dos danos nos cantos da parede. Finalmente, a acção transversal levou à destruição de tijolos na fiada superior e a um decréscimo da frequência própria de vibração do pano de alvenaria para fora do seu plano de um valor inicial perto dos 20 Hz para um valor final de cerca de 3 Hz.

A Fig. 21 apresenta a resposta da parede no seu plano em termos da força horizontal aplicada e do deslocamento associado à variação de comprimento da diagonal da parede, medido através de um transdutor de deslocamento. A cinzento está representada a resposta correspondente ao nível 2 da acção sísmica (63% do nível de referência), onde é visível a abrupta diminuição de rigidez quando aparece a fenda horizontal inicial. A preto representa-se a resposta correspondente ao nível de referência da acção sísmica (nível 4). Pode verificar-se que a rigidez não se degrada significativamente entre os dois níveis, mas durante a actuação do sismo de referência dá-se uma nova degradação de rigidez, associada a maior fendilhação da parede.



Figura 20. Evolução do dano observado no segundo modelo, desde o final do nível 2 da acção sísmica (63% do nível de ref.) até ao final do nível 6 (292% do nível de ref.).

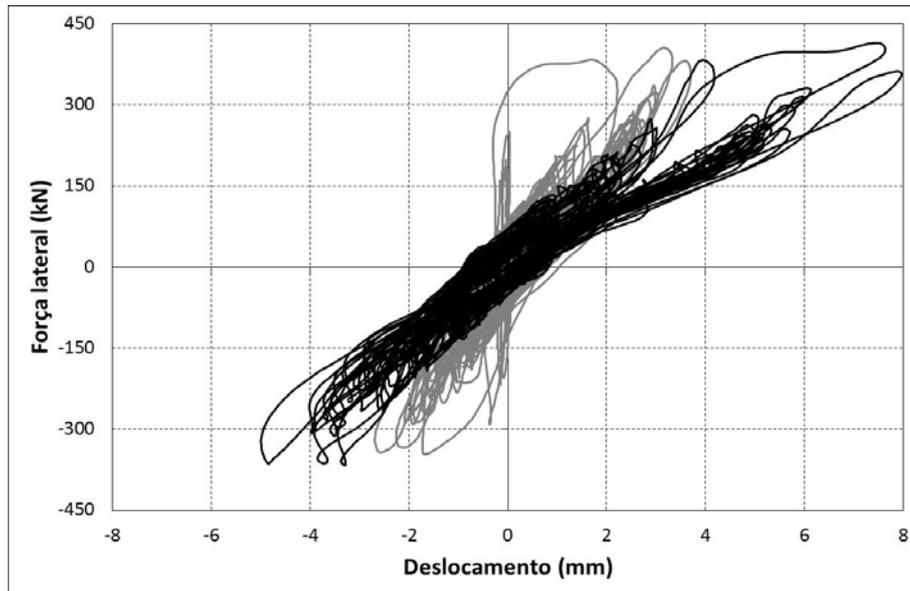


Figura 21. Resposta no plano da parede para os níveis 2 e 4 da acção sísmica.

O colapso do pano de alvenaria para fora do plano não foi observado, em nenhum dos ensaios, devido aos constrangimentos geométricos para a ocorrência de uma rotação dos sub-painéis que se formaram após a fendilhação da parede. Tal mecanismo de rotação é impossibilitado pela espessura da parede e pelo confinamento do pórtico; para que esse tipo de colapso se materializasse seria necessário que a fiada superior do pano de alvenaria fosse destruída, de forma a criar o espaço necessário para que o mecanismo de rotação para fora do plano ocorra. A destruição quase total dessa fiada superior foi observada na fase final dos ensaios, podendo concluir-se que um estado limite de colapso iminente para fora do plano foi atingido.

### 3. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi utilizado o conceito de subestruturação para, utilizando todas as potencialidades das instalações sísmicas do LNEC, desenvolver um dispositivo e uma metodologia inovadores de ensaios sísmicos em paredes de alvenaria de enchimento, em pórticos de betão armado, suprimindo uma lacuna existente a nível mundial.

Tanto o dispositivo de ensaio (TIM) como a metodologia idealizada para a realização dos ensaios foram descritos. Apresentaram-se ainda alguns resultados dos ensaios preliminares realizados em paredes sem reforço, estando previstos ensaios adicionais com diferentes metodologias de reforço.

Os ensaios iniciais serviram para comparar a resposta da parede para fora do plano, com e sem dano no seu próprio plano. Daí resulta evidente a maior degradação da rigidez da parede para fora do plano quando nela se desenvolve previamente um mecanismo de rotura no seu plano. Ficou também evidente durante os ensaios que o colapso completo do pano de alvenaria para fora do seu plano é extremamente difícil de ser atingido, devido à própria

limitação geométrica desse movimento, para uma parede sem aberturas, envolvida por um pórtico e centrada na sua espessura.

Finalmente, o tratamento dos resultados dos ensaios aqui apresentados e a realizar no futuro próximo serão muito úteis para o desenvolvimento continuado de modelos numéricos para previsão e interpretação do comportamento das paredes de alvenaria. Por outro lado, afigura-se que os resultados obtidos serão muito importantes para o desenvolvimento de regulamentação europeia mais adequada ao dimensionamento e pormenorização destes elementos estruturais.

## AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam o seu agradecimento pelo financiamento atribuído ao projecto SERIES através do 7º programa-quadro de apoio da União Europeia, bem como a todos os participantes no projecto e, em particular, aos investigadores da NTUA e da UMinho que colaboraram nestes ensaios. O primeiro autor manifesta ainda o seu agradecimento à Fundação para a Ciência e Tecnologia pelo apoio financeiro concedido, através de uma bolsa de pós-doutoramento, para a prossecução das suas actividade de investigação.

## REFERÊNCIAS

- [1] Coelho, E.; Carvalho, F. – "Ensaio sísmicos – Instalações do LNEC", *Engenharia e Vida*, 2005, N° 10, pp. 51-55.
- [2] SERIES – *Seismic Engineering Research Infrastructures for European Synergies*. Em <http://www.series.upatras.gr/> (acesso a 31/07/2014).
- [3] NP EN 1998-1 – *Eurocódigo 8 - Projecto de estruturas para resistência aos sismos - Parte 1: Regras gerais, acções sísmicas e regras para edifícios*. IPQ, Portugal, 2010, 230 p.
- [4] Angel, R. – *Behavior of reinforced concrete frames with masonry infills*. Tese de Doutoramento, Dep. de Engenharia Civil, Universidade de Illinois, Urbana-Champaign, EUA, 1994.
- [5] Flanagan, R.D.; Bennett, R.M. – "Bidirectional behaviour of structural clay tile infilled frames", *Journal of Structural Engineering*, 1999, Vol. 125, N° 3, pp. 236-244.
- [6] Calvi, G.M.; Bolognini, D.; Penna, A. – "Seismic performance of masonry-infilled r.c. frames: benefits of slight reinforcements", *6º Cong. Nac. de Sismologia e Eng. Sísmica*, Guimarães, 2004.
- [7] Calvi, G.M.; Bolognini, D.; Penna, A. – "Design of masonry structures with bed joint reinforcement", *Seminário sobre paredes de alvenaria*, Ed. por P.B. Lourenço, Guimarães, 2007.
- [8] Komaraneni, S. – *Out-of-plane seismic behaviour of brick masonry infilled panels with prior in-plane damage*. Tese de Doutoramento, Dep. de Engenharia Civil, IIT Kanpur, Índia, 2009.
- [9] Seissoft – *SeismoStruct: A computer program for static and dynamic nonlinear analysis of framed structures*. Versão 6.9.5, disponível em <http://www.seissoft.com>, Pavia, Itália, 2013.
- [10] SAP2000 – *Structural Analysis Program*. Versão 15.0.0, Computers and Structures, Inc. Berkeley, EUA, 2013.