

ENSAIOS DINAMICOS EM PAREDES DE FRONTAL POMBALINAS

Ana Gonçalves *

Bolseira
ICIST, IST, UL
Lisboa
Goncalves.amn@gmail.com

Luís Guerreiro

Prof. Associado
ICIST, IST, UL
Lisboa

Paulo Candeias

Investigador Auxiliar
Convidado
LNEC
Lisboa

João Ferreira

Prof. Associado
ICIST, IST, UL
Lisboa

Alfredo Campos Costa

Investigador Principal
LNEC
Lisboa

SUMÁRIO

O estudo apresentado neste trabalho teve como objetivo caracterizar experimentalmente o comportamento dinâmico das paredes de frontal Pombalinas, através de ensaios realizados na mesa sísmica no Laboratório Nacional de Engenharia Civil em Lisboa.

No presente artigo expõem-se as opções que estiveram na base da conceção do modelo das paredes para a realização dos ensaios na plataforma sísmica triaxial. Apresentam-se a conceção do protótipo e a construção dos modelos físicos incluindo a definição da sua geometria, a caracterização dos materiais, os detalhes da sua construção e as dificuldades encontradas nos ensaios.

Por fim apresentam-se os resultados da caracterização modal da estrutura de parede metálica, para avaliar o seu dimensionamento e a sua influência no ensaio. Posteriormente, e com o intuito de avaliar a influência da alvenaria na resposta do modelo, apresenta-se o ensaio de identificação modal das paredes só com estrutura de madeira, e o ensaio de identificação do modal do modelo das paredes pombalinas.

Palavras-chave: Ensaios dinâmicos, Mesa sísmica, Paredes Pombalinas, Alvenaria.

1. INTRODUÇÃO

Os Edifícios Pombalinos, assim designados em homenagem ao Marquês de Pombal, são estruturas com o máximo de quatro pisos, com arcadas no piso térreo, pavimentos de madeira nos pisos superiores, paredes de alvenaria na fachada e paredes de frontal no interior. As paredes de frontal consistem num pórtico de madeira constituído por elementos verticais (prumos), horizontais (travessas) e diagonais (escoras, formando cruces designadas de Santo André), preenchido com alvenaria.

Embora a estrutura "pombalina" tenha um bom comportamento sísmico, depois de mais de 250 anos estas construções necessitam de obras de reabilitação por causa da sua degradação natural, das intervenções inadequadas a que foram submetidas (tais como a adição de andares, modificação de elementos estruturais ou alteração da funcionalidade do edifício) e porque as novas exigências regulamentares são mais rigorosas no que se refere à resistência aos sismos.

Os ensaios realizados no Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas do Departamento de Estruturas do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Lisboa (Portugal), tiveram como objetivo avaliar diretamente o desempenho sísmico das paredes de frontal pombalinas. Para tal foram construídos dois modelos em escala real, com o intuito de reproduzir o comportamento de um edifício pombalino. Os ensaios na mesa sísmica inserem-se num programa experimental que se iniciou no IST com ensaios cíclicos em paredes frontais pombalinas [1].

No presente artigo expõem-se as opções que estiveram na base da conceção do protótipo para a realização dos ensaios na plataforma sísmica triaxial do LNEC, bem como a construção dos modelos experimentais incluindo a definição da sua geometria e a caracterização dos materiais, os detalhes da sua construção e as dificuldades encontradas nos ensaios.

Em seguida apresentam-se os equipamentos de observação definidos de modo a registar a evolução das grandezas que interessam ao presente estudo e o procedimento de ensaio tendo em vista a simulação adequada do comportamento sísmico dos edifícios Pombalinos.

Por fim analisaram-se os resultados experimentais dos ensaios na mesa sísmica do LNEC. Foram realizados dois tipos de ensaios que correspondem ao ensaio de solitação sísmica em que a ação sísmica foi aplicada com amplitudes crescentes, e ao ensaio de identificação modal com o objetivo de avaliar a evolução das propriedades mecânicas do modelo. Neste artigo apenas se vai abordar os ensaios de solitação sísmica.

2. DEFINIÇÃO DO MODELO FÍSICO

O programa experimental tem como objetivo avaliar o desempenho sísmico das paredes de frontal existentes nos edifícios pombalinos. O primeiro passo foi definir o modelo físico que representa as paredes de frontal. A conceção dos modelos físicos foi sempre rodeada de

grandes cuidados e incertezas, pois pretende-se que os modelos reproduzam os fenómenos físicos associados ao comportamento sísmico na realidade o mais fielmente possível.

O modelo físico que se apresenta é inovador, pois é o primeiro ensaio dinâmico na mesa sísmica realizado em modelos de paredes de frontal pombalina. Os modelos a ensaiar na plataforma sísmica do LNEC devem reproduzir os aspetos mais relevantes do comportamento dos edifícios “Pombalinos” quando sujeitos à ação sísmica. Como existem várias geometrias e características que definem a parede de frontal, adotaram-se as mesmas características dos ensaios realizados no Instituto Superior Técnico [1]. Os modelos representam as características originais numa perspectiva de reabilitação dos edifícios atuais.

Para além das características das paredes, a definição dos modelos experimentais é resultado das limitações impostas pelas condições da realização dos ensaios, que são: as dimensões da plataforma na mesa sísmica e a logística de transporte dos modelos para a mesa sísmica. Outro fator que também teve muita importância na conceção dos modelos e se apresenta como inovação do modelo é a simulação do efeito da fachada sobre as paredes de frontal.

Começando pela definição dos modelos das paredes de frontal, estas reproduzem o comportamento das paredes com dois pisos, com uma altura total de 6 m, comprimento de 3m e um afastamento entre paredes de 2,7m. Cada parede tem dois painéis de 3x3 m² que são ligados no primeiro piso através de ligações de meia madeira e pregos. A espessura da parede é de 12 cm. Os prumos e as diagonais têm uma secção de 8x12 cm². A travessa no meio é de 22x12 cm² e no topo de 20x12 cm². Os pisos são formados por barrotes de 10x12 cm², afastados 15 cm, sobrepostos por uma placa de contraplacado de 16 mm aparafusada aos barrotes. A estrutura é constituída por barrotes de madeira de pinho bravo, e todas as ligações entre as madeiras são de meia madeira, exceto as diagonais, que são pregadas nos prumos e travessas.

Os modelos são preenchidos entre os prumos, travessas e diagonais com alvenaria de tijolos maciços. Os ensaios foram realizados com a alvenaria ainda jovem. Optou-se por uma composição bastarda com o traço de 1:2:6 (cimento: cal: areia). Os materiais utilizados foram cal hidratada (aérea), cimento Portland 32,5 N e areia numa relação areia lavada de rio/areia de areeiro de 2/1. O tempo de secagem das alvenarias (período entre a construção das paredes e os ensaios) foi de um mês e meio.

Como já foi dito anteriormente, com este ensaio pretendeu-se estudar o comportamento das paredes de frontal à ação sísmica, sendo fundamental reproduzir o comportamento da fachada sobre as paredes de frontal.

A fachada foi simulada através de uma estrutura metálica que teve como base a distribuição da massa ao longo da fachada na direção vertical das paredes. A fachada metálica é ligada à parede de frontal através das travessas da cruz da Santo André, o que corresponde a seis pontos em cada parede. Essa ligação é feita através de chapas que são aparafusadas à

madeira e à estrutura metálica, sendo removíveis para posterior reaplicação (i.e. novos ensaios).

A estrutura tem 12 massas de 600 kg, distribuídas aos pares em altura, com vários graus de liberdade para ter capacidade de deformação e redistribuição das massas pelos pisos. A estrutura articulada foi conseguida através da colocação de rótulas em altura. Apresenta-se na Figura 1 a geometria da fachada e da ligação às paredes de frontal.

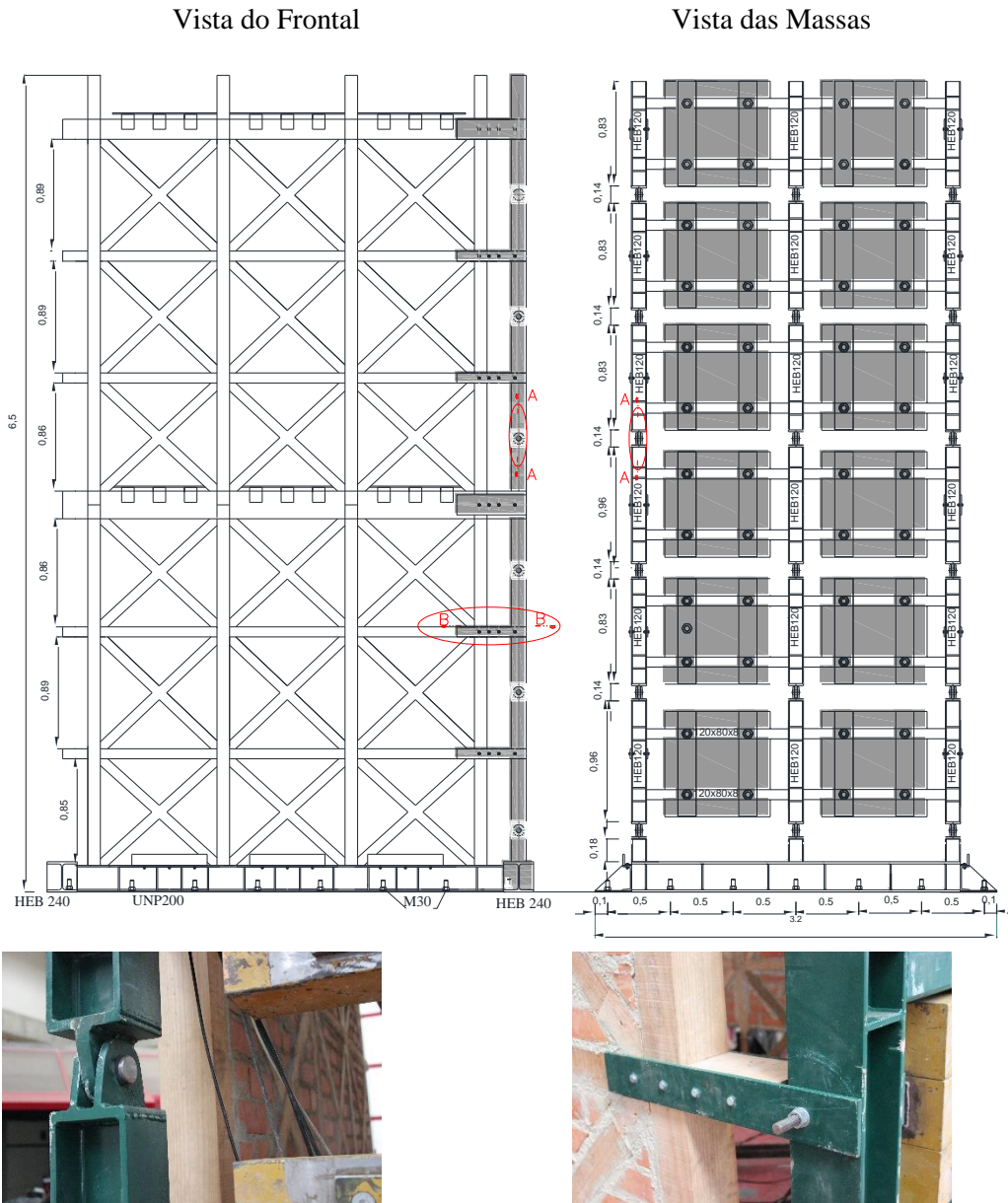


Figura 1 - Geometria do modelo das paredes pombalinas

3. CONSTRUÇÃO DO MODELOS

A construção dos modelos foi realizada sobre bases projetadas especificamente para estes ensaios e que serviram igualmente para transporte e fixação à plataforma sísmica.

A estrutura de madeira das paredes de frontal foi construída em modelos com nove cruces de Santo André e transportadas para o LNEC (Figura 2a). A construção dos modelos em madeira foi um processo relativamente rápido e com a seguinte linha de montagem: i) regularização das superfícies da madeira nas travessas da base, de forma a poder ser possível encaixá-la nas bases metálicas; ii) colocação das placas de teflon nas bases coladas com resina, de forma a minimizar o atrito entre a estrutura de madeira e a base metálica (Figura 2b); iii) aplicação das células de carga na extremidade sul do barrote (Figura 2b); iv) encaixe das paredes nas bases metálicas; v) pregagem dos barrotes para a construção do primeiro piso (Figura 2c); vi) colocação do segundo painel em cada modelo (Figura 2d); vii) colocação do segundo piso para contraventar as paredes (Figura 2d); viii) por fim, colocação do contraplacado em cada piso.



Figura 2 – Montagem dos modelos; a) transporte dos painéis das cruces de Santo André; b) bases do modelo; c) colocação do primeiro piso; d) colocação do segundo piso.

Após a construção das paredes, foi feita a montagem da estrutura metálica que simula a fachada. A montagem é descrita pelas seguintes etapas: i) encaixaram-se as massas na estrutura metálica dividida por níveis (Figura 3a); ii) ligaram-se os níveis (estruturas

metálicas), através de três pontos com ligações articuladas (Figura 3a); iii) no topo na estrutura montou-se o perfil (em três pontos articulada) que fazem a ligação da parede metálica a ponte rolante (Figura 3 b), iv) por fim, a estrutura metálica fixou-se na base, através de três pontos com ligações articuladas.



a)

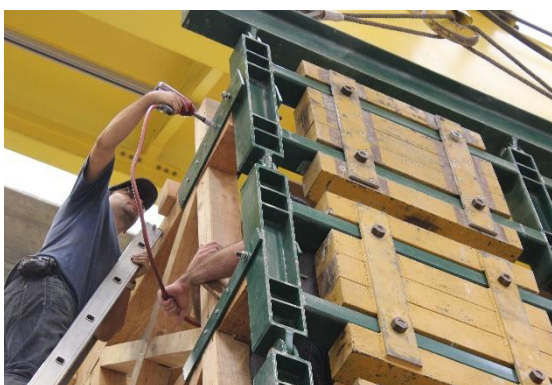


b)

Figura 3 – Montagem da parede metálica; a) construção de dois níveis; b) construção da parede metálica.

Com a conclusão da montagem, colocou-se o modelo das paredes na mesa sísmica com o auxílio da ponte rolante e dos sistemas de transporte. Em seguida colocou-se a parede metálica, fixando-a na mesa e nas travessas de madeira por meio de chapas, conforme Figura 4.

Durante a montagem da parede metálica na mesa sísmica, concluiu-se que era necessário melhorar a fixação, utilizando para isso um sistema de fixação já existente no LNEC, que corresponde à colocação de quatro perfis perpendiculares à base da parede metálica, ligados à mesa sísmica.



a)



b)

Figura 4 - Parede metálica: a) ligação da parede metálica ao modelo; b) transporte da parede metálica.

4. INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação utilizada nos ensaios foi idealizada de modo a permitir efetuar a medição das grandezas físicas consideradas mais relevantes de acordo com o comportamento esperado deste tipo de edifícios à ação sísmica. A instrumentação necessária para este estudo inclui: i) transdutores de deslocamento; ii) acelerómetros; iii) células de carga; iv) sensores óticos. Na Figura 5 está representado o esquema da instrumentação (acelerómetros, LVDT e sensores óticos).

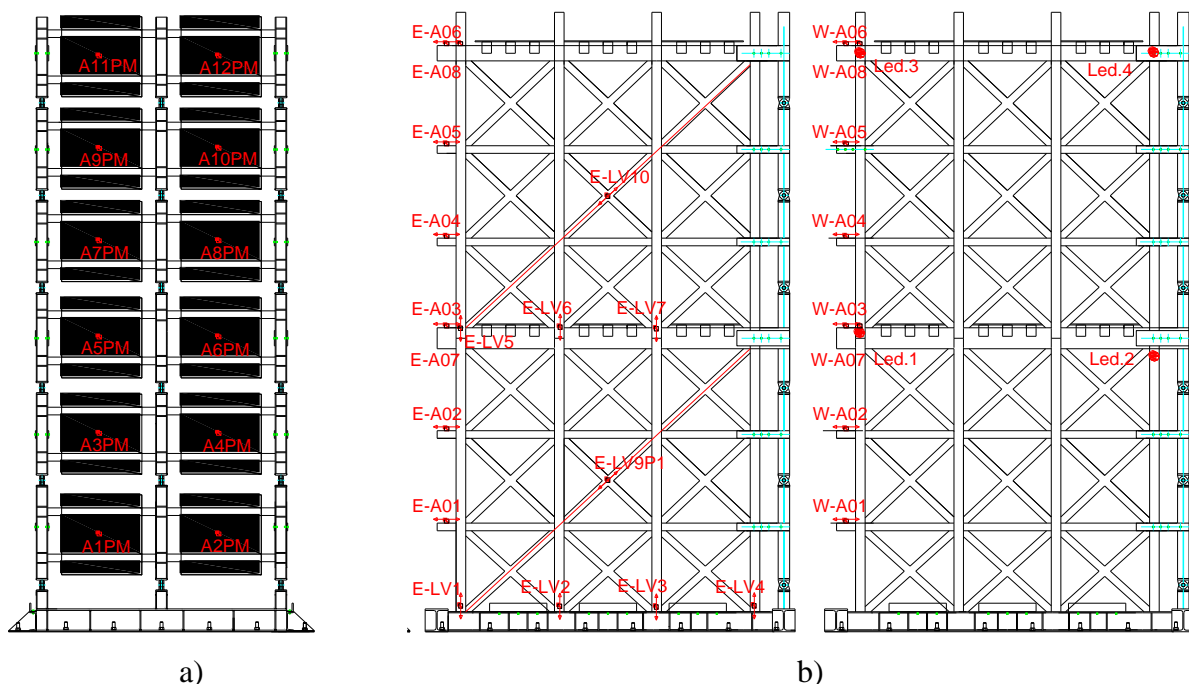


Figura 5 - Instrumentação; a) acelerómetros na parede metálica (A1PM...A12PM); b) acelerómetros na parede de frontal Este (E-A01...E-A08) e na parede Oeste (W-A01...W-A08), transdutores de deslocamento (E-LV1...E-LV10); sensores óticos (Led1...Led4).

No caso destes ensaios, os acelerómetros foram instaladas das duas paredes de frontal e na parede metálica. Colocaram-se acelerómetros a vários níveis do modelo, localizados em cada travessa nas paredes de frontal e em cada massa da estrutura metálica, para medir o campo de acelerações horizontais no plano das paredes frontais e perpendicular à estrutura metálica. Dado poder existir movimentos para fora do plano, foram colocados acelerómetros nos dois pisos, perpendiculares a cada parede.

Para perceber o comportamento da estrutura é importante conhecer os deslocamentos verticais dos prumos da base e entre os pisos. Como não foi possível instrumentar as duas paredes, apenas se colocaram LVDT's na parede Este, nos quatro prumos na base, três entre os prumos no piso e dois nas diagonais (Figura 5b).

O sistema ótico transdutor HAMAMATSU (C5949) foi usado para medir deslocamentos ao longo do eixo x e y no planos perpendiculares à linha de visão (horizontal ou vertical). O

sistema faz uso de uma câmara de CCD de elevada resolução (dez milhões de pixels), que é montada firmemente sobre uma estrutura metálica que está paralela à parede. Cada lente controla o deslocamento que queremos medir, que neste caso são os deslocamentos vertical e horizontal dos prumos na extremidade da parede Oeste, correspondendo a quatro pontos, dois no topo e dois no piso intermédio em cada extremidade.

As células de carga utilizadas para medir as forças foram desenvolvidas e calibradas pelo LNEC. Para medir a força lateral que vai atuar na base da estrutura durante o ensaio colocaram-se quatro células de carga nas suas extremidades, duas por cada parede.

5. ACÇÃO APLICADA

Nos ensaios na mesa sísmica usaram-se acelerogramas artificiais, gerados pelo software LNEC-SPA [3] que define a amplificação do espectro de resposta. Nos ensaios realizados na plataforma sísmica triaxial, foram utilizados fundamentalmente dois tipos de sinais: o sinal de solicitação sísmica e o sinal de identificação modal. O sinal de identificação modal dos modelos é caracterizado por uma gama de frequências de 0,1Hz a 40Hz, equivalente a um ruído branco. O sinal é totalmente artificial, e destina-se a permitir a identificação das frequências e modos de vibração dos modelos, aplicando técnicas de análise estocástica. A série tem que ser longa e com uma amplitude tal que não interfira com os resultados dos ensaios de solicitação sísmica (Figura 6).

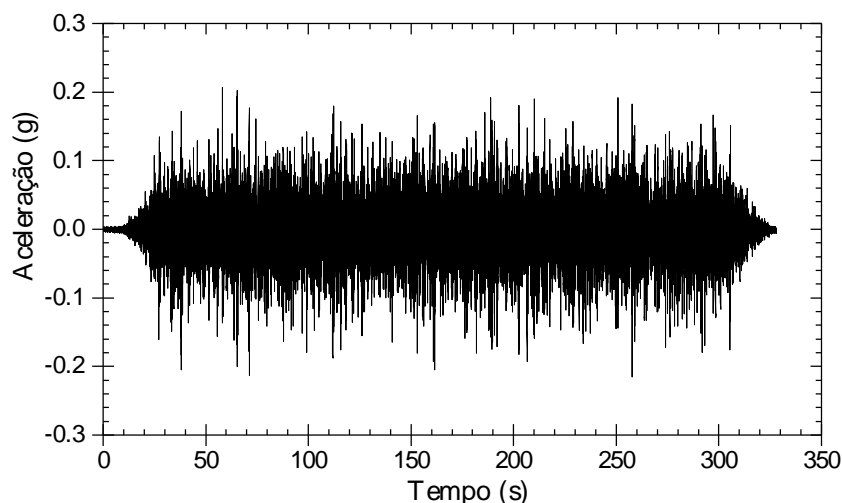


Figura 6 - Sinal de identificação modal.

O sinal de solicitação sísmica foi definido a partir do espectro de resposta regulamentar para a zona 2,3 (Sismo afastado da zona de Lisboa) de acordo com o Eurocódigo 8 [4], para um terreno tipo D (depósitos de solos não coesivos de compactidade baixa a médias com e sem alguns estratos de solos coesivos moles ou solos predominantemente coesivos de consistência mole a dura). A Figura 7 apresenta o espectro de resposta das acelerações utilizado nos ensaios, ajustado ao Eurocódigo 8, com aceleração, velocidade e deslocamento no sinal, com valores máximos de 0.33 g, 273,9 mm/s e 60.5 mm, respetivamente.

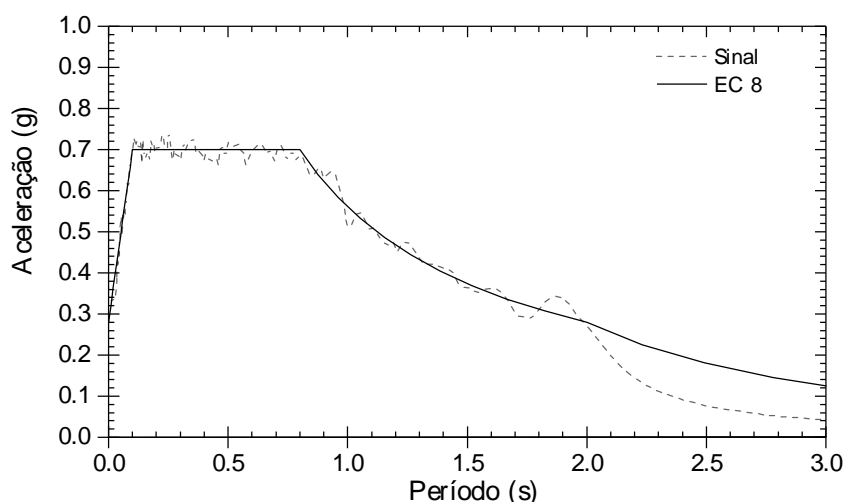


Figura 7 – Espectro de resposta do ensaio.

Nos ensaios dinâmicos os sinais de solicitação sísmica foram sendo alternados com o sinal de identificação modal. Os ensaios dinâmicos nos modelos iniciam-se com a imposição do sinal de identificação modal para determinar as propriedades dinâmicas do modelo inicial, seguindo-se o ensaio de solicitação sísmica. O processo repete-se, alternando o sinal de identificação modal com a solicitação sísmica com amplitude crescente, até se atingir o estado máximo de danos no modelo ou a capacidade máxima da plataforma sísmica. Na Tabela 1 estão indicadas as etapas realizadas durante o ensaio.

A amplitude do sinal de solicitação sísmica está relacionada com o período de retorno do sismo. Nos ensaios realizados consideraram-se os seguintes períodos de retorno: 73 anos; 225 anos; 475 anos; 975 anos e 2000 anos.

Tabela 1- Fases do ensaio dinâmico

Ensaio	Fase	Período de retorno (anos)
1	Identificação Modal 1	
2	1ª Fase	73
3	Identificação Modal 2	
4	2ª Fase	225
5	Identificação Modal 3	
6	3ª Fase	475
7	Identificação Modal 4	
8	4ª Fase	975
9	Identificação Modal 5	
10	5ª Fase	2000
11	Identificação Modal 6	

6. PROCEDIMENTO DE ENSAIO

O procedimento de ensaio tem o objetivo de quantificar e qualificar o comportamento das paredes de frontal pombalinas face à ação sísmica de modo a permitir uma posterior avaliação da sua vulnerabilidade baseada na informação obtida. A avaliação do comportamento foi realizada através da identificação das propriedades dinâmicas dos modelos ao longo do ensaio e por meio da medição da resposta dos modelos à solicitação sísmica imposta na base com amplitude crescente através de acelerómetros [5].

A campanha experimental apresentada neste artigo consiste nos ensaios de identificação modal do modelo constituído apenas por madeira e estrutura metálica, que foi designado por Modelo 0 (Figura 8a), e nos ensaios de identificação modal nos modelos com a estrutura de madeira e alvenaria, designado Modelo 1-1 (Figura 8b). Estes ensaios são importantes para comparar as características modais dos modelos com e sem alvenaria.

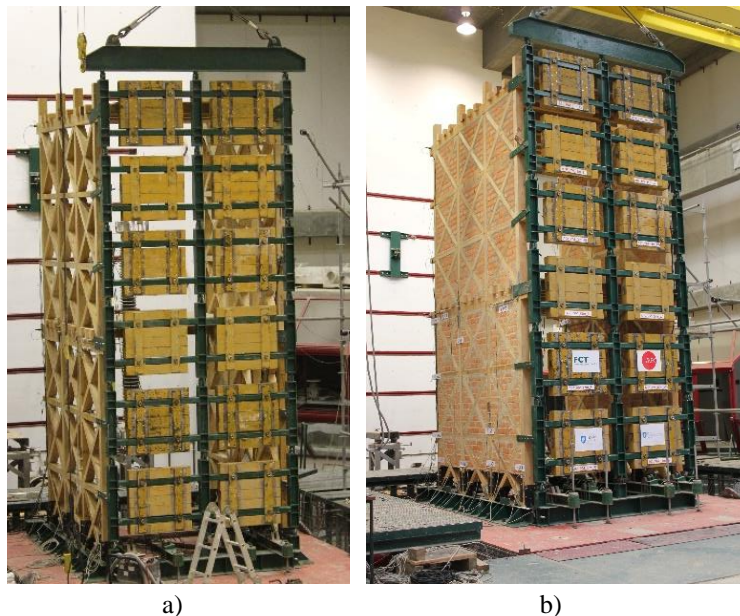


Figura 8 – Modelos analisados: a) modelo só com madeira (Modelo 0), b) Modelo com madeira e alvenaria (Modelo 1-1).

7. METODOLOGIAS USADAS NA ANALISE DOS RESULTADOS

A informação que é obtida diretamente em ensaios dinâmicos de estruturas consiste em séries temporais da excitação e da resposta. A transformação dessas séries para o domínio da frequência permite observar algumas das características dinâmicas das estruturas, servindo por isso de base à identificação modal. A identificação modal tem por objetivo identificar as propriedades dinâmicas dos modelos, nomeadamente as frequências, as configurações e o coeficiente de amortecimento dos principais modos de vibração.

A análise da informação obtida em ensaios dinâmicos, através da sua resposta no domínio da frequência, passou a ter maior utilização com o desenvolvimento do algoritmo da *Fast Fourier Transform* (FFT) [6], que implementa, de uma forma eficiente, o cálculo da transformação discreta finita de Fourier, pois é nesta operação matemática que se baseia a transformação das séries temporais para o domínio da frequência.

Quando se consideram funções de densidades espectral de potência fisicamente mensuráveis, $G_{xx}(f)$, $G_{yy}(f)$ e $G_{xy}(f)$, as equações 1 e 2 podem tomar a seguir identificação:

$$G_{YY}(f) = |H(f)|^2 \cdot G_{XX}(f) \quad (1)$$

$$G_{YX}(f) = H(f) \cdot G_{XX}(f) \quad (2)$$

Na identificação modal foram utilizados os sinais de entrada e saída, as acelerações absolutas registadas, na plataforma sísmica e no modelo respetivamente. Os sinais foram previamente tratados tendo em vista o cálculo das funções de resposta em frequência (FRF), através da aplicação de filtros passa-baixa de Fourier, com uma frequência de corte nos 40 Hz. No cálculo das FRF foi utilizado o método de Welch [7; 8] para suavizar as funções e reduzir a sua dispersão. Foram utilizados segmentos com 2^{10} (1024) pontos, preenchidos com o número mínimo de zeros para permitir a aplicação do algoritmo FFT com uma janela de *Hanning* e sobreposição de 2/3, Este conjunto de operações de processamento dos sinais foi desenvolvido no programa Matlab [9], dado ter as funções já implementadas e por isso vantagens relativamente a outras linguagens.

Após a obtenção das propriedades dinâmicas dos modelos, foi utilizada a variação da frequência modal para quantificar a evolução do dano, levando-se em conta a relação fundamental entre as frequências naturais, a massa e a rigidez de um oscilador com um grau de liberdade [10] aplicado ao modo n e no ensaio i .

$$\omega_{i,n}^2 = (2\pi \cdot f_{i,n})^2 = \frac{K_{i,n}}{M_{i,n}} \quad (3)$$

onde $f_{i,n}$, $K_{i,n}$ e $M_{i,n}$ representam, respetivamente, a frequência de vibração, a rigidez generalizada e a massa generalizada do modo n no ensaio i , admitindo uma formulação de dano isotrópico entre o ensaio inicial (0) e atual (a).

$$K_{n,a} = (1 - D_{n,a}) \cdot K_{n,0} \Leftrightarrow D_{n,a} = 1 - \frac{M_{n,a} \cdot f_{n,a}^2}{M_{n,0} \cdot f_{n,0}^2} \quad (4)$$

A massa generalizada de estruturas com vários graus de liberdade tem a particularidade de depender da configuração modal, a qual pode ser normalizada para que a massa generalizada seja unitária. Assim sendo, e, na hipótese de as configurações modais não se alterarem significativamente ao longo dos ensaios, para que os modos sejam comparáveis entre os vários ensaios, é possível simplificar a expressão anterior e obter [11]:

$$Dn,a \approx 1 - \left(\frac{f_{n,a}}{f_{n,\rho}} \right) \quad (5)$$

Nesta expressão o valor do dano, que é representado habitualmente sob a forma de percentagens, varia ente 0% e 100%, correspondendo o primeiro ao estado inicial e o segundo ao dano total.

8. RESULTADOS DOS ENSAIOS DE IDENTIFICAÇÃO MODAL

8.1 Modelo 0

No Modelo 0 (modelo apenas com madeira e parede metálica) foi realizado apenas um ensaio de identificação modal com o objetivo de saber qual a contribuição da alvenaria nos modos de vibração. Não foi possível aplicar ensaios de solicitação sísmica por insuficiência de modelos físicos. Foram identificadas várias frequências modais entre os 3.84 Hz e os 25 Hz, embora para frequências superiores a 15 Hz tenha sido difícil identificar os modos devido à baixa coerência entre os sinais. Foram identificados 3 modos de vibração longitudinais, sendo o primeiro longitudinal com torção. Na Tabela 2 apresentam-se os modos de vibração e na Figura 9 a sua configuração nos modos.

Tabela 2 – Frequências modais do Modelo 0

Modo	1°	2°	3°	4°
Frequência (Hz)	3,84	4,59	11,09	16,98
Tipo de modo	Long. + Torção	Long.	Long.	Long.

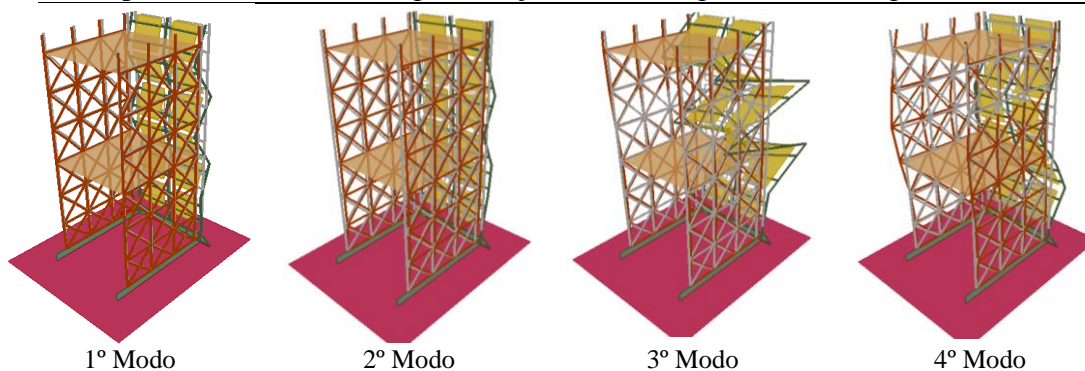


Figura 9 - Configuração dos modos do Modelo 0

8.2 Modelo 1-1

No Modelo 1-1 foram realizados seis ensaios de identificação modal, designados de Modal 1 a Modal 6. Foram identificados cinco modos de vibração entre os 4,9 Hz e os 19 Hz, que correspondem a três modos longitudinais e dois com movimento de torção e longitudinal (Figura 10).

As frequências dos modos de vibração são as indicadas na Tabela 3, onde se constata a tendência decrescente dos seus valores em consequência da ação sísmica crescente imposta ao modelo.

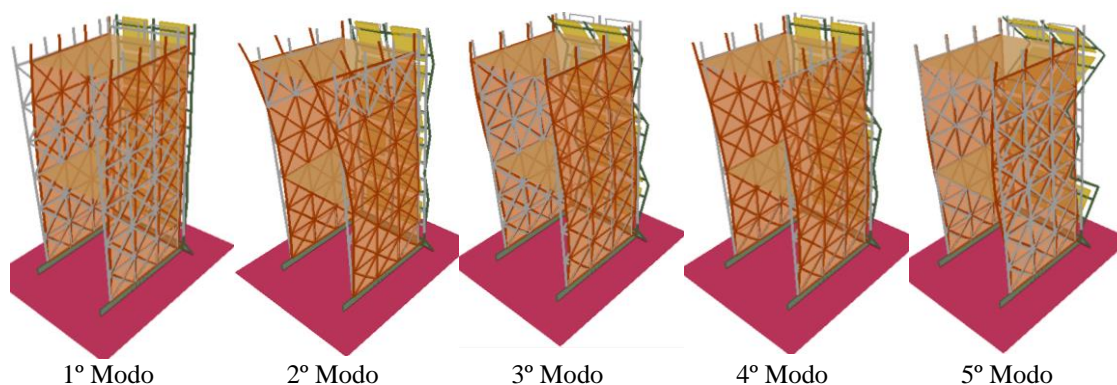


Figura 10 - Configuração dos modos do Modelo 0

A evolução das frequências modais ao longo dos ensaios é ilustrada na Figura 11, onde as frequências dos modos de vibração decrescem ao longo dos ensaios. No primeiro modo existe um decréscimo de 40%, entre o primeiro ensaio de caracterização, no segundo modo é de 12% o decréscimo e no terceiro e quarto modo existe um decréscimo de 20% e 13%, respetivamente.

Tabela 3– Frequências modais no Modelo 1-1 para as várias caracterizações

Ensaio	Período de retorno (anos)	Modo				
		1º	2º	3º	4º	5º
Modal 1	0	4,90	5,71	12,35	14,08	18,75
Modal 2	73	4,86	5,65	12,35	14,07	18,73
Modal 3	225	4,69	5,61	12,34	14,04	18,70
Modal 4	475	4,24	5,03	11,66	13,86	18,09
Modal 5	975	3,22	3,70*	10,96	13,01	17,38
Modal 6	2000	3,00	3,51*	10,01	12,38	16,30
Tipo de modo		Long.	Long.+ Torção	Long.	Long.+ Torção	Long.

Legenda: *- Novo modo que apareceu devido ao dano na estrutura.

Para concluir a análise do Modelo 1-1, descrevem-se os danos observados durante o ensaio. Os danos observados no modelo foram aumentando progressivamente ao longo dos ensaios de solitação sísmica a que foi sujeito, registando-se os primeiros danos observados (i.e. macroscópicos) para a ação com período de retorno de 475 anos, com o destacamento da alvenaria da madeira e o levantamento dos prumos, com início no primeiro nível das cruces de Santo André (na base) e no primeiro piso, por consequência dos levantamentos dos prumos, seguindo-se o esmagamento da alvenaria nos cantos. A Figura 12 ilustra os principais danos observados no modelo.

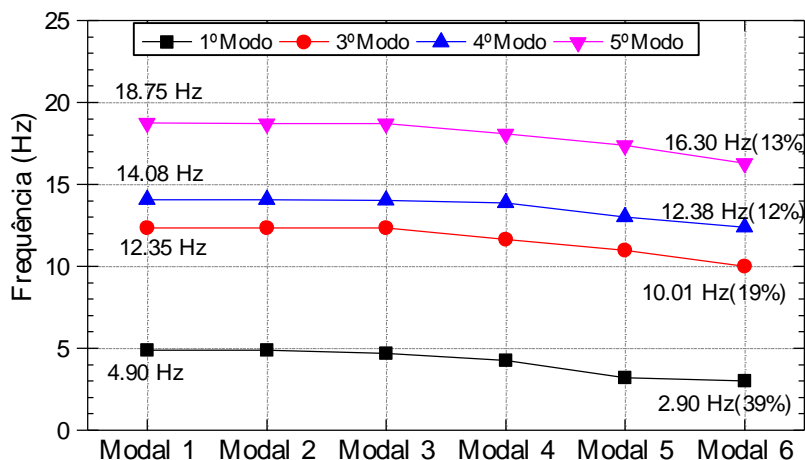


Figura 11 – Degradação das frequências

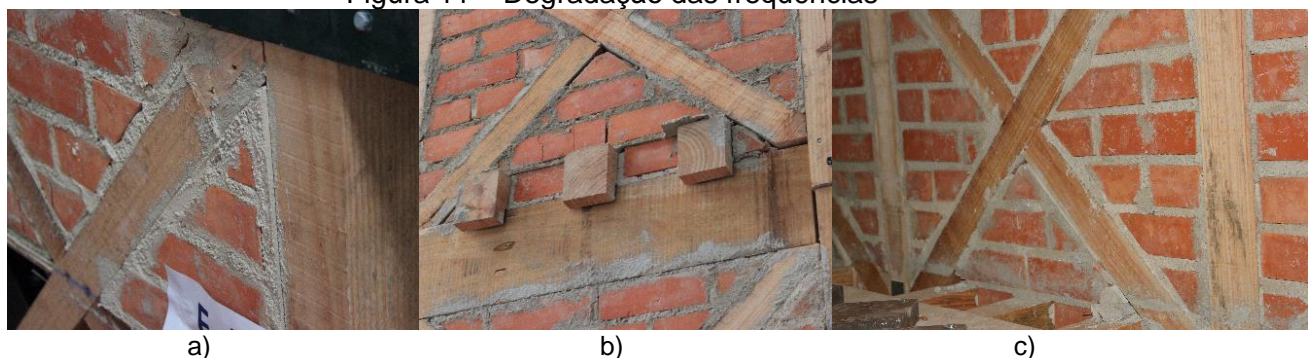


Figura 12 – Danos observados: a) destacamentos de alvenaria na base; b) destacamento da alvenaria, no primeiro piso e desalinhamento dos prumos; d) esmagamento da alvenaria

8.3 Comparação do Modelo 0 e Modelo 1-1

Um dos objetivos deste estudo era perceber a contribuição da alvenaria para o comportamento das paredes à ação sísmica. Na Figura 13 compara-se o primeiro ensaio de identificação modal (*i.e.* Modal 1) do modelo só com madeira (Modelo 0) com o modelo com alvenaria (Modelo 1-1). Observa-se que em todos modos a frequência modal é inferior no Modelo 0, indicando que a alvenaria aumenta a rigidez global do modelo.

A equação (7) quantifica o aumento da rigidez, relacionando a massa e a frequência de vibração da estrutura. A massa do modelo 0 é de 11252 Kg e a do Modelo 1-1 é 14017 Kg, obtendo-se perto do dobro da rigidez no Modelo 1-1 em relação ao Modelo 0.

Salienta-se que o modo de torção é nítido nas três paredes do Modelo 0, ao passo que no Modelo 1-1 observa-se apenas na parede Oeste (W), indicando que a alvenaria contribui para o aumento da rigidez de torção.

$$f = \sqrt{\frac{K}{M}} \Leftrightarrow \frac{4.88}{3.88} = \sqrt{\frac{\frac{K_2}{K_1}}{\frac{14017}{11252}}} \Leftrightarrow \frac{K_2}{K_1} = 1.97 \quad (7)$$

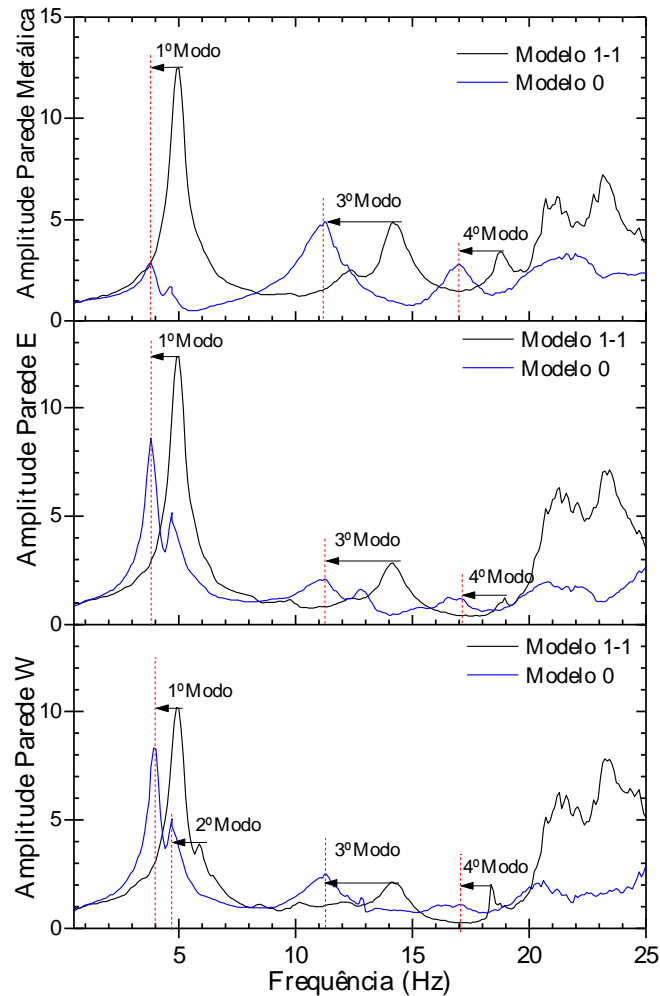


Figura 13 - Comparação entre o Modelo 1-1 e o Modelo 0

CONCLUSÕES

Na análise dos ensaios de identificação modal foi possível determinar as frequências próprias e os respetivos danos, em cada modelo, de forma a obter conclusões sobre a rigidez e dano nos modelos ao longo dos ensaios. O programa de ensaios experimentais permitiu observar que o modelo com alvenaria apresentou maior frequência modal do que o modelo sem alvenaria. Concluiu-se que a alvenaria é importante para o aumento da rigidez da estrutura, devido ao confinamento da madeira e suas ligações. Apesar de o peso do modelo ter incrementado devido à aplicação de alvenaria, é inegável o contributo da alvenaria para o aumento da rigidez.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FCT o financiamento deste trabalho através do projeto PTDC/100168/2008 – REABEPA, à HCI a colaboração na construção dos modelos de ensaio, e aos funcionários do Núcleo de Engenharia Sísmica e Dinâmica de Estruturas do LNEC na montagem dos ensaios.

REFERÊNCIAS

- [1] Gonçalves, A.; Ferreira, J.; Guerreiro, L.; Branco, F. – Caracterização experimental do comportamento cíclico de paredes pombalinas simples e reforçadas, *Revista Engenharia Civil*, 2013, Vol. 45, p.: 5-19
- [2] Lourenço, P.; Branco, J.; Cruz, H. e Nunes, L. – Avaliação experimental do comportamento sísmico de casas de madeiras. Seminário Casas de Madeira, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Guimarães. 2013.
- [3] Mendes, L.; e Costa, A. – LNEC-SPA, *Signal Processing and Analysis Tools for Civil Engineers - version 1,0 - build 12*, Relatório 29/2007 - NESCE, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, Portugal
- [4] NP EN 1991-1 – “NP EN 1998-1, Eurocódigo 8: Projeto de estruturas para resistência aos sismos – Parte 1: Regras gerais, ações sísmicas e regras para edifícios”. *European Standard*, CEN, Instituto Português da Qualidade, Março 2010.
- [5] Coelho, E.; Costa, A.; Sousa, L.; Carvalho, E.- Avaliação da vulnerabilidade de estruturas e ensaios sísmicos, 4º Encontro Nacional sobre Sismologia e Engenharia Sísmica, Faro, 1999
- [6] Cooley, J. e Tukey, J.- *An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series. Mathematics of Computation*, 1965, Vol.19, Nº. 90, p: 297-301.
- [7] Carvalho, E.; Oliveira, C.; Fragoso, M.; Miranda, V. – Regras gerais de reabilitação e reconstrução de edifícios correntes afetados pela crise sísmica do Faial, Pico e S. Jorge iniciada pelo sismo de 9 de Julho de 1998, *Materiais de Construção e Estruturas*, Relatório 100/98, Laboratório Regional de Engenharia Civil, Região Autónoma dos Açores, Lisboa.
- [8] Bendat, J. e Piersol, A. – *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. Wiley Interscience, ISBN: 0471317330.
- [9] MathWorks, *MATLAB The Language of Technical Computing. Version 9*, MathWorks Inc., <http://www.mathworks.com>,
- [10] Chopra, A. – *Dynamics of Structures: Theory and Application to Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1995, ISBN: 0138552142
- [11] Candeias P. – Avaliação da vulnerabilidade sísmica de edifícios de alvenaria. Tese de Doutoramento, Guimarães, Universidade do Minho, 2008,