

CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE EDIFÍCIOS ATRAVÉS DE ANÁLISE MODAL EXPERIMENTAL



Ana Marques*

Bolseira de Iniciação à
Investigação
Laboratório Nacional de
Engenharia Civil
Lisboa
aimarques@lnec.pt



Paulo Candeias

Investigador Auxiliar
Convidado
Laboratório Nacional de
Engenharia Civil
Lisboa
pcandeias@lnec.pt



Alfredo Campos Costa

Investigador Principal
Laboratório Nacional de
Engenharia Civil
Lisboa
alf@lnec.pt

SUMÁRIO

Neste artigo é apresentado o tipo de instrumentação, a metodologia utilizada e os resultados obtidos num ensaio de caracterização dinâmica realizado num edifício de betão armado de 9 pisos sem dimensionamento sismo-resistente construído no final da década de 1970 recorrendo à medição das vibrações causadas pela excitação ambiente. Apresenta-se também a metodologia de elaboração de um modelo numérico representativo com recurso a elementos finitos no qual se ajustaram alguns parâmetros para que as primeiras frequências de vibração e as respetivas configurações modais desse modelo correspondessem aos resultados experimentais. O principal objetivo deste estudo consiste no desenvolvimento de um modelo numérico mais refinado para o estudo do comportamento dinâmico da estrutura.

Palavras-chave: Identificação modal, Ensaios de vibração ambiente, Calibração de modelos numéricos.

1. INTRODUÇÃO

As ações dinâmicas em estruturas são bastante frequentes: o vento, o tráfego, as forças geradas por sistemas mecânicos, o movimento humano e os sismos. Todos constituem exemplos típicos daquelas ações, sendo esta última um dos fenómenos naturais com maior potencial devastador para as estruturas.

Existindo uma necessidade evidente de melhorarmos o conhecimento acerca do comportamento dinâmico das estruturas, nas últimas décadas tem-se verificado uma crescente preocupação com o refinamento dos métodos de análise dinâmica aplicados neste contexto, nomeadamente no que diz respeito aos métodos de análise modal experimental. Se por um lado estes métodos permitem obter um conhecimento mais aprofundado sobre as características estruturais, condições de serviço e até de critérios de desempenho das estruturas, por outro lado também possibilitam projetar as estruturas de modo a melhorar alguns comportamentos dinâmicos ou até mesmo resolver problemas de dinâmica estrutural em projetos já existentes.

2. DESCRIÇÃO GERAL DO EDIFÍCIO

O edifício em estudo localiza-se no distrito de Lisboa e apresenta 9 pisos e uma cave enterrada. As lajes dos pisos são maciças e suportadas por vigas de secção retangular. O edifício, em forma de “L”, encontra-se na esquina de um quarteirão com edifícios construídos sensivelmente na mesma época. Tem a particularidade de apenas de um dos lados existir um edifício adjacente dado que do outro lado o lote está vago.

Após uma análise de toda a documentação disponível relativa ao projeto do edifício, não se encontraram referências a qualquer tipo de cálculo sísmico. Apenas se faz menção na nota de cálculo do projeto de alterações afirmando que não poderão ser realizadas atividades que induzam vibrações nas lajes do edifício tais como ginástica ou dança. Tal facto revela por si só a elevada deformabilidade das lajes para cargas verticais o que corrobora a inexistência de elementos verticais suficientes para suporte dessas lajes, as quais possuem vãos elevados.

Numa análise das peças desenhadas fornecidas foi possível detetar alguns aspetos relevantes, nomeadamente a inexistência de pilares de canto do edifício, vigas que descarregam os esforços em outras vigas, vigas com grandes vãos (na ordem dos 8 a 9 metros), mudanças no alinhamento de alguns pilares e existência de um edifício contíguo com irregularidade em altura relativamente ao edifício em estudo.

3. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA

3.1. Campanhas de medição das vibrações

Foram efetuados ensaios de caracterização dinâmica no edifício em estudo, recorrendo à medição das vibrações devidas a excitação ambiente, tendo em vista produzir experimentalmente as características dinâmicas da estrutura a serem utilizadas posteriormente na calibração do respetivo modelo numérico.

Foram efetuadas sete campanhas de medição de vibrações induzidas pela excitação ambiente (provenientes do vento, do tráfego, forças geradas por sistemas mecânicos, movimento humano, etc.), utilizando o sexto piso como referência para posteriormente

relacionar as amplitudes e fases das vibrações medidas. Os resultados obtidos foram analisados com recurso a técnicas que permitem obter estimativas das frequências próprias, modos de vibração e coeficientes de amortecimento.

A metodologia utilizada nas medições consistiu em centralizar a aquisição de dados em pontos estrategicamente escolhidos de forma a minimizar as distâncias aos sensores, distribuir os acelerómetros de forma adequada à caracterização dinâmica e estabelecer a transmissão dos sinais com recurso a cabos. A fixação dos sensores foi efetuada utilizando técnicas com o menor impacto possível, tendo-se recorrido a sistemas com base em colagens de fácil remoção. A figura 1 ilustra a fixação típica de acelerómetros.



Figura 1. Pormenores da fixação dos acelerómetros.

Os sensores utilizados foram acelerómetros de grande sensibilidade do tipo piezoelétrico. Recorreu-se a unidades de condicionamento de sinal concentradas junto à unidade de aquisição de dados, a qual englobava uma placa de digitalização de 16 bits e um computador portátil.

Foram efetuadas medições de longa duração tendo-se recorrido a registos de 20 minutos de forma a assegurar a qualidade dos resultados em termos de resolução espectral. A aquisição de dados foi efetuada com recurso ao módulo *High Speed Acquisition* do software *LNEC-SPA* desenvolvido no Laboratório Nacional de Engenharia Civil [1]. Este módulo, conforme se ilustra na figura 2, permite efetuar a aquisição de dados com frequências de amostragem muito elevadas de forma a minimizar o fenómeno de *aliasing*, aplicar automaticamente filtros digitais e proceder à re-amostragem do sinal para que a dimensão do registo não seja elevada.

Foram realizadas ao todo sete campanhas de medição de vibrações, num total de 48 canais. No plano de instrumentação admitiu-se que os pavimentos se comportavam como diafragmas rígidos no seu plano pelo que se colocaram apenas quatro acelerómetros por piso, junto aos cunhais do edifício.

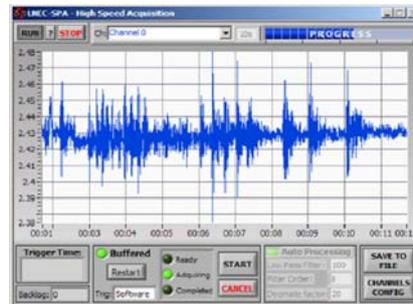


Figura 2. Interface gráfica do módulo *High Speed Acquisition* do software LNEC-SPA.

3.2. Metodologia de análise de sinais

Neste trabalho foram utilizadas técnicas de identificação modal para sistemas em que se desconhece a excitação a que a estrutura se encontra sujeita (*output-only*). Assim sendo, é conveniente estabelecer como válidas as seguintes hipóteses: a excitação é estacionária, Gaussiana e com energia semelhante na banda de frequências de interesse (ruído branco truncado). Nestas circunstâncias o cálculo de estimativas da Função de Resposta em Frequência (*FRF*), que define as características do sistema estrutural e permite relacionar a excitação com a resposta, pode ser obtido diretamente a partir da resposta, uma vez que a contribuição da excitação é constante para todas as frequências. Desta forma, os picos de ressonância da *FRF* (H), indicadores da presença de modos de vibração, podem ser obtidos diretamente dos picos das densidades espectrais de potência da resposta (G):

$$|H(f)|^2 = \frac{G(f)}{const.} \quad (1)$$

Prova-se que, caso exista a transformada de *Fourier*, bastando para tal que se verifique a condição de *Dirichlet* [2], o que acontece para eventos com média nula (e.g. sismos e vibrações ambiente), a função de auto-correlação (C) definida no domínio do tempo e a função de densidade espectral de potência (G) definida no domínio da frequência, relacionam-se através desta transformada [3], podendo-se definir:

$$G(f) = TF[C(t)] \quad (2)$$

$$C(t) = TF^{-1}[G(f)] \quad (3)$$

3.2.1. Método de identificação - *Frequency Domain Decomposition* (FDD)

A metodologia utilizada na identificação modal consistiu em aplicar o método usualmente denominado por *Frequency Domain Decomposition* (*FDD*). Este método baseia-se na diagonalização das matrizes de densidade espectral de resposta, de forma a decompô-las nas contribuições modais em cada frequência. A diagonalização pode ser feita através do

algoritmo de decomposição em valores singulares (*SVD*). Estes procedimentos foram utilizados por diversos autores, salientando-se os trabalhos de Corrêa & Campos Costa [4], Peeters [5], Prevosto [6], Shih et al. [7]. No entanto, só com o trabalho de Brincker [8] surgiu de forma sistematizada o método e os seus fundamentos [9].

3.2.2. Método de identificação - *Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD)*

Foi também utilizado o método denominado por *Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD)* proposto por Brincker [10], o qual permite obter estimativas do amortecimento modal e melhorar as estimativas das frequências de vibração relativamente ao método *FDD*. De uma forma sucinta, este método consiste na aplicação de um ajuste às funções de auto-correlação de sistemas de um grau de liberdade, obtidas a partir das funções de densidade espectral, selecionando através de um critério e ponderando um conjunto de pontos na vizinhança de cada ressonância, e por último, aplicando a inversa da transformada de *Fourier*. O critério utilizado neste método consiste em definir um valor limite do coeficiente *MAC*, *Modal Assurance Criteria* [11], que considera valores entre 0 e 1, obtendo-se o valor unitário quando os modos de vibração têm a mesma configuração e valor nulo quando são ortogonais. O coeficiente *MAC* é definido por:

$$MAC(i, j) = \frac{|\varphi_i^T \varphi_j|^2}{(\varphi_i^T \varphi_i)(\varphi_j^T \varphi_j)} \quad (4)$$

Este método permite obter com maior precisão as estimativas das frequências de vibrações, conforme se ilustra na figura 3, uma vez que é baseado na passagem a zero do ajuste à função de auto-correlação e não apenas a um valor de pico que pode ser influenciado por vários fatores, como a resolução em frequência. O amortecimento modal pode ser obtido do decremento logarítmico da função (figura 3 b))

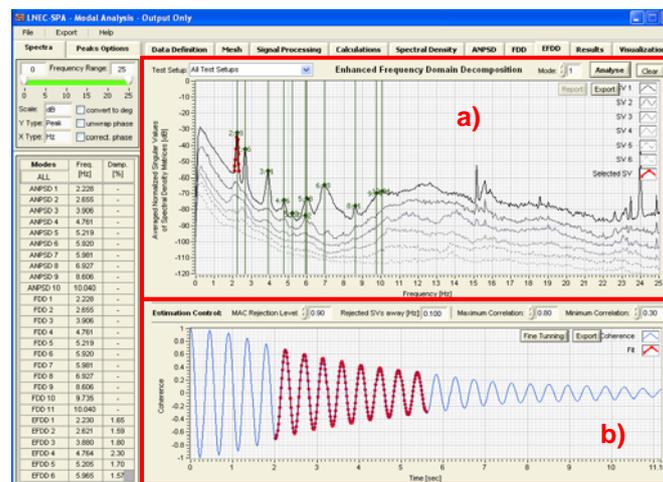


Figura 3. Exemplo de aplicação do método *EFDD*: a) Matriz dos valores singulares e b) Estimativa da frequência (passagens ascendentes por zero), amortecimento (decremento logarítmico) e estimativa da resposta ao impulso.

3.3. Software de análise

Foi desenvolvido no LNEC, integrado no *software* LNEC-SPA, um módulo de identificação modal para sistemas *output-only*. Este módulo, denominado *Modal Analysis-Output-Only*, implementa os métodos de análise apresentados anteriormente, e tem como principais vantagens: i) ser compatível com os ficheiros obtidos na aquisição de dados, não sendo necessária qualquer operação de conversão de formatos; e ii) permitir exportar os resultados obtidos na forma de tabelas e em visualizações tridimensionais.

Com recurso ao referido *software* foram aplicadas aos registos obtidos, de forma sequencial, as seguintes técnicas de processamento de sinal: i) remoção da média (offset); ii) filtragem com filtro de Fourier do tipo passa-baixo a 25 Hz; iii) re-amostragem para 62,5 Hz (Decimação de 8x) e iv) remoção dos primeiros 2 segundos do sinal.

Na figura 4 apresenta-se a título ilustrativo a interface gráfica durante a análise efetuada para este estudo.

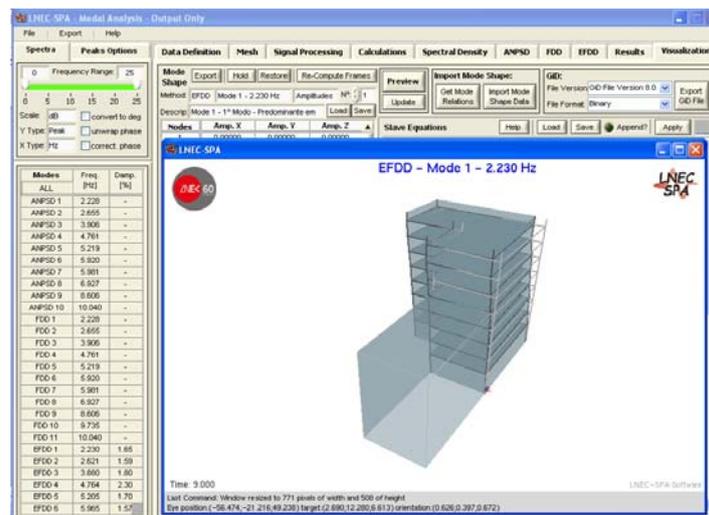


Figura 4. Interface gráfica do módulo *High Speed Acquisition* do *software* LNEC-SPA.

3.4. Configurações modais

As visualizações 3D bem como a informação numérica sobre as configurações modais podem ser obtidas como resultado do *software* de análise em tabelas e gráficos. A configuração modal resulta da aplicação da seguinte expressão:

$$\Phi = \{A_x \cos(\theta_x); A_y \cos(\theta_y); A_z \cos(\theta_z)\} \quad (5)$$

onde Φ representa o vetor que define a configuração do modo de vibração; (A_x, A_y, A_z) e $(\theta_x, \theta_y, \theta_z)$ representa as amplitudes e as fases da configuração segundo $(X, Y$ e $Z)$, respetivamente.

Para efetuar a animação do modo basta incrementar a fase de cada componente varrendo valores entre $[0, 2\pi]$:

$$\theta_n = \theta_i + \Delta\theta \quad (6)$$

Adiciona-se também informação sobre a configuração para o instante inicial ($\Delta\theta=0$). Estes últimos resultados encontram-se afetados de um conjunto de equações matemáticas (*slave equations*) de forma a permitir a animação dos pontos em que não foram efetuadas medições ou nos pontos em que os resultados não apresentaram a qualidade desejada.

4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foi possível identificar 10 modos da estrutura que se encontram resumidos no quadro 1.

Quadro 1. Características dos modos de vibração identificados.

Número do modo	Descrição	Frequência [Hz]	Período [s]	Amortecimento [%]
1	1º modo y (predominante em y)	2,2	0,45	1,65
2	1º modo x (predominante em x)	2,6	0,38	1,59
3	1º modo – torção	3,8	0,26	1,80
4	Modo local	4,7	0,21	2,30
5	Modo local	5,2	0,19	1,70
6	Modo local predominante em x	6,0	0,16	1,56
7	Modo local	6,0	0,16	1,57
8	2º modo y (predominante em y)	7,0	0,14	2,47
9	2º modo em y + Torção	8,5	0,11	0,87
10	2º modo de Torção	9,7	0,10	1,34

Descrevem-se em seguida os três primeiros e os três últimos modos de vibração identificados por serem os mais relevantes. O primeiro modo foi identificado com frequência de 2,2 Hz e a sua configuração modal revela que se trata do primeiro modo na direção y, embora com alguma expressão na direção x, provavelmente em consequência de excentricidades em planta entre o centro de rigidez e de massa.

O segundo modo foi identificado com frequência de 2,6 Hz e a sua configuração modal revela que se trata do primeiro modo na direção x. Neste caso a configuração modal revela que se trata de um modo praticamente puro, com pouca expressão na direção y.

O terceiro modo foi identificado com frequência de 3,8 Hz e a sua configuração modal revela que se trata do primeiro modo de torção, apresentando uma configuração modal muito bem definida.

O oitavo modo foi identificado com frequência de 7,0 Hz e a sua configuração modal revela que se trata do segundo modo na direção y , pois apresenta 1 ponto de inflexão em altura.

O nono modo foi identificado com frequência de 8,5 Hz, apresentando-se como resultante do acoplamento, do que parece ser um 2º modo em y e de um modo de torção ao nível dos primeiros 5 pisos.

O décimo modo foi identificado com frequência de 9,7 Hz, apresentando bem definida o segundo modo de torção do edifício.

Relativamente ao amortecimento modal obtiveram-se valores entre 0,9% e 2,5%, com um valor médio de 1,7%. Estes valores são um pouco abaixo do considerado usual em estruturas de betão armado, no entanto, é necessário ter em consideração que estes valores são plausíveis tendo em conta que o nível de vibração é baixo e que o amortecimento tem tendência a aumentar com o aumento do nível das vibrações e o aparecimento de fenómenos não lineares e dissipativos.

5. CALIBRAÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

5.1. Modelo numérico preliminar

A modelação numérica foi efetuada com base nas peças escritas e desenhadas. Todo este processo foi acompanhado num levantamento fotográfico do exterior e interior do edifício com o recurso a câmaras digitais.

Para a realização do modelo numérico da estrutura utilizou-se um programa de cálculo automático tridimensional [12]. Foi aplicado o método dos elementos finitos, utilizando elementos finitos de barra para modelar os pilares e vigas e elementos finitos laminares de casca para simular as paredes, pavimentos e cobertura. O modelo desenvolvido é constituído por cerca de 17410 elementos laminares de casca, 840 elementos de barra e 17450 nós, implicando cerca de 104690 graus de liberdade (6 GL por nó). Na figura 5 apresenta-se o modelo numérico preliminar elaborado.

Na elaboração do modelo numérico foram adotados valores de referência (valores de projeto, preconizados pelas disposições regulamentares) para as ações e características mecânicas dos materiais (betão e alvenarias). Estes valores serão objeto de calibração com base nos resultados dos ensaios experimentais realizados.

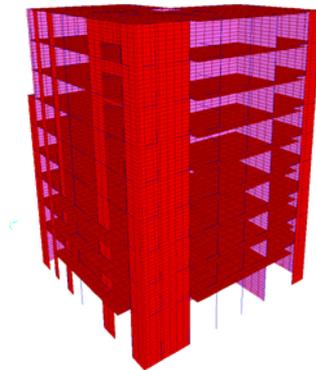


Figura 5. Modelo numérico preliminar elaborado.

Constatou-se que, por comparação com os resultados apresentados no quadro 1, os modos de vibração obtidos com este modelo numérico não se ajustam aos valores experimentais. Assim, conclui-se que o modelo numérico preliminar não reproduz fielmente os resultados experimentais observados havendo necessidade de se proceder a um ajuste de modelo para que os resultados das análises sísmicas numéricas reproduzam o mais aproximadamente possível aquilo que se irá observar na estrutura aquando da ocorrência de sismos.

5.2. Ajuste do modelo numérico

Tendo em conta o modelo numérico preliminar apresentado anteriormente e os resultados do ensaio *in situ*, elaborou-se um modelo numérico mais refinado que permite simular de forma mais adequada o comportamento dinâmico do edifício em estudo.

Pretendeu-se desta forma calibrar o modelo preliminar de modo a que as primeiras frequências próprias e as respetivas configurações modais correspondessem adequadamente aos resultados experimentais. Para tal, foram realizados vários estudos paramétricos, revisões e ajustes ao modelo numérico de modo a satisfazer este objetivo.

De um modo geral, com os parâmetros adotados inicialmente, o modelo analítico revelou-se mais deformável do que o protótipo, isto é, a sua rigidez global é inferior à real. Neste contexto foi necessário procedermos ao ajuste dos parâmetros do modelo de cálculo de forma a conseguirmos obter as frequências identificadas experimentalmente.

Apresentam-se algumas das medidas genéricas que são usualmente adotadas com o objetivo de aproximar os resultados da modelação numérica aos resultados que correspondem ao comportamento estrutural identificado experimentalmente:

- Contemplar a existência de paredes de alvenaria que contribuem significativamente para a rigidez global da estrutura;
- Utilizar uma massa mais adequada à situação real (existem alguns pisos sem divisórias interiores);

- Simular a existência de edifícios adjacentes ao edifício em estudo, através da colocação de molas segundo a direção x no contorno das paredes confinantes, ou, em alternativa, modelar, de modo aproximado, os edifícios adjacentes de forma a simular convenientemente a sua rigidez;
- Ajustar o valor do módulo de elasticidade do betão e das alvenarias efetuando diversas análises com diferentes valores.

No caso de estudo já tinham sido contempladas todas as paredes de alvenarias exteriores, assim como a maior parte das paredes de alvenaria interiores.

Incluiu-se a massa correspondente à sobrecarga da estrutura no valor das propriedades dos materiais, nomeadamente no peso específico do betão, para que assim fosse possível fazer variar o seu valor mais facilmente.

Das medidas acima referidas revela-se especialmente importante a simulação da existência do edifício adjacente. Verifica-se que o edifício adjacente influenciou significativamente algumas das configurações modais do edifício em estudo.

Numa primeira iteração, foram colocadas molas segundo a direção x , nos nós que faziam parte da empena comum com o edifício adjacente. O estudo da rigidez destas molas foi estimado aproximadamente, com vista à distribuição de um valor de rigidez adequado às várias molas. Como esta aproximação não se revelou muito eficiente, efetuou-se uma modelação aproximada do edifício contíguo ao edifício em estudo. Foi simulado o desnivelamento de pisos entre edifícios, aspeto que, como se sabe, pode ser bastante gravoso numa análise sísmica.

Como não foi possível obter os elementos de projeto do edifício adjacente, foi utilizado um modelo simples seguindo os critérios adotados no relatório LNEC [13] e com o auxílio de visitas ao local e recorrendo a vários levantamentos fotográficos foi realizado um novo refinamento do modelo, com vista a obter uma melhor aproximação das condições reais. Na figura 6 apresenta-se o novo modelo numérico elaborado.

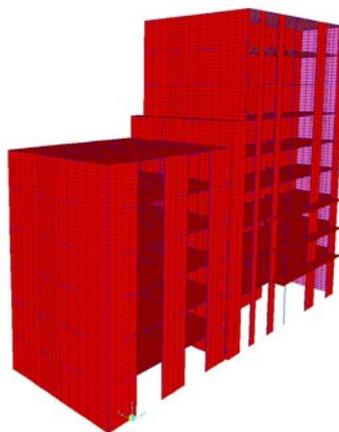


Figura 6. Novo modelo numérico adotado.

Relativamente ao acerto do modelo a partir da variação do módulo de elasticidade do betão, do módulo de elasticidade das alvenarias e da massa, foram efetuados vários estudos paramétricos, conforme se ilustra nas figuras 7, 8 e 9. A melhor concordância encontrada entre os resultados experimentais e os resultados numéricos foi o que se ilustra na figura 10.

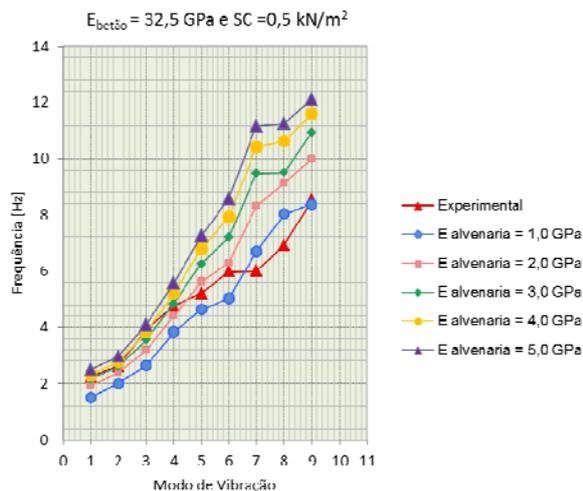


Figura 7. Estudo paramétrico considerando valores para o módulo de elasticidade das alvenarias de 1 a 5 GPa.

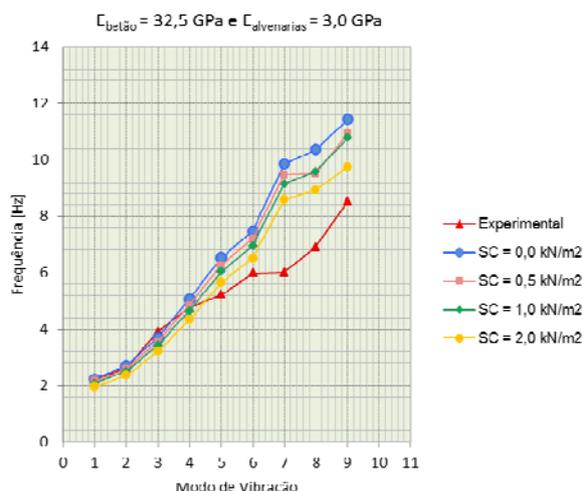


Figura 8. Estudo paramétrico considerando valores para a sobrecarga de 0,5 a 2 kN/m².

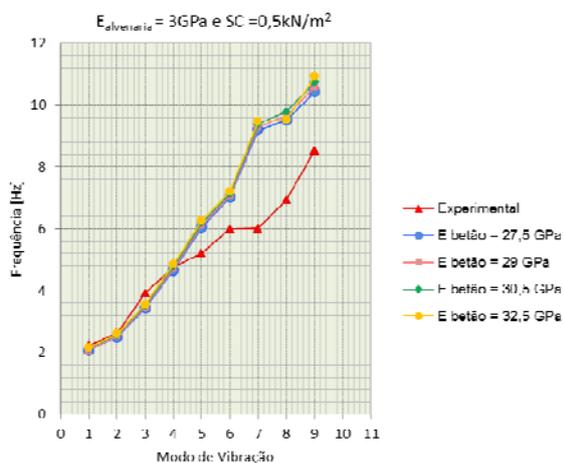


Figura 9. Estudo paramétrico considerando valores para o módulo de elasticidade do betão de 27,5 GPa a 32,5 GPa.

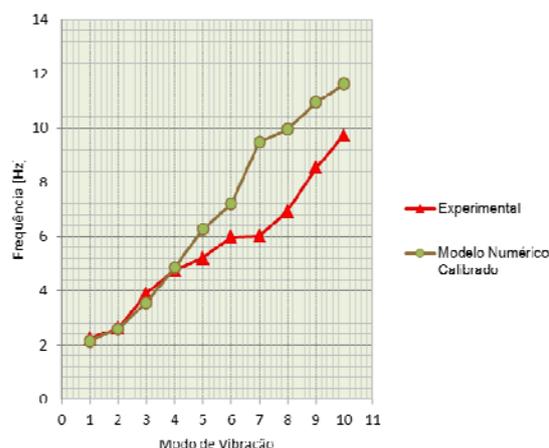


Figura 10. Comparação entre resultados experimentais e os resultados do modelo numérico adotado após o processo de calibração.

A partir este estudo, verificou-se que os valores que melhor ajustaram o modelo numérico aos resultados experimentais foram: módulo de elasticidade do betão 32,5 Gpa, módulo de elasticidade da alvenaria 3 GPa, e sobrecarga 0,5 kN/m². Relativamente às configurações modais podemos concluir que a influência que o edifício adjacente tem sobre o

comportamento dinâmico do edifício de estudo é bastante significativa na calibração do modelo numérico.

5.3. Fiabilidade do modelo analítico

Assim, para o modelo analítico escolhido, apresenta-se no quadro 2 os valores dos factores de participação modais e massas modais associados a cada modo de vibração, obtidos para movimentos rígidos da base de translação horizontal nas duas direções X, Y e de rotações em torno do eixo vertical. Desta forma obtém-se uma perspectiva da relevância que cada modo terá no comportamento sísmico para os movimentos da base de translação em cada direcção.

Quadro 2. Resumo da análise modal.

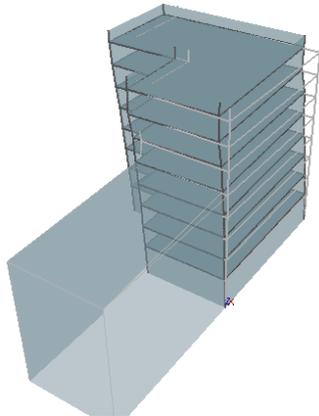
Número do modo	Frequência [Hz]	Massa modal efetiva X [%]	Massa modal efetiva Y [%]	Massa modal efetiva Z [%]	Massa modal efetiva acumulada X [%]	Massa modal efetiva acumulada Y [%]	Massa modal efetiva acumulada Z [%]
1	2,2	4,43	37,18	0,00	4,43	37,18	0,00
2	2,6	48,79	4,26	0,00	53,22	41,44	0,00
3	3,6	0,65	4,05	0,01	53,88	45,49	0,01
4	4,9	0,00	17,33	0,00	53,88	62,82	0,01
5	6,3	12,97	1,62	0,00	66,85	64,44	0,01
6	7,2	3,89	7,14	0,27	70,73	71,58	0,28
7	9,5	1,09	0,60	1,03	71,83	72,19	1,31
8	10,0	0,07	0,01	47,26	71,90	72,19	48,57
9	10,9	0,20	0,15	0,84	72,09	72,34	49,41
10	11,6	0,32	0,00	0,01	72,41	72,34	49,42

Analisando os valores de massa modal mobilizada pode afirmar-se que o primeiro modo é um modo de translação segundo Y (ou seja, na direcção transversal) tendo mobilizado 37% da massa modal efetiva nessa direcção. O segundo modo conseguiu mobilizar 48% da massa na direcção X e o terceiro modo mobilizou 4% da massa em rotação segundo o eixo vertical Z. A análise modal foi corrida para 10 modos onde se conseguiu mobilizar 72% da massa na direcção X, 72% na direcção Y e 49% para a rotação segundo Z.

Na figura 11 apresenta-se um resumo com os resultados obtidos em termos de frequências e configurações modais para cada um dos quatro primeiros modos de vibração identificados através dos ensaios experimentais e do modelo analítico.

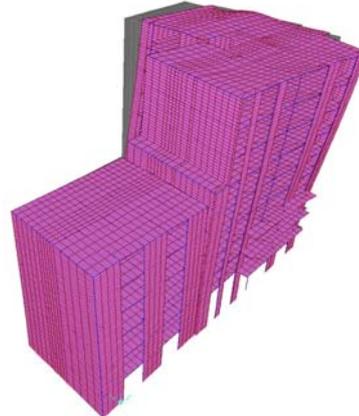
No quadro 3 apresenta-se os coeficientes MAC para os vários modos de vibração. Na figura 12 apresenta-se um gráfico de barras tridimensional que permite ter uma percepção mais imediata da correlação entre as componentes modais.

1º modo de vibração experimental



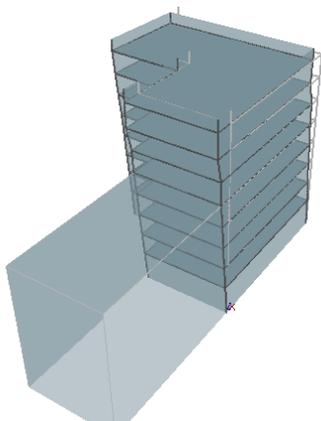
$f = 2,2 \text{ Hz}$

1º modo de vibração do modelo numérico



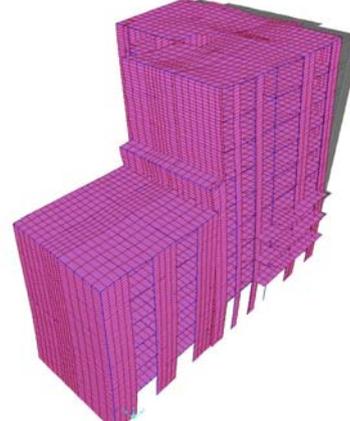
$f = 2,2 \text{ Hz}$

2º modo de vibração experimental



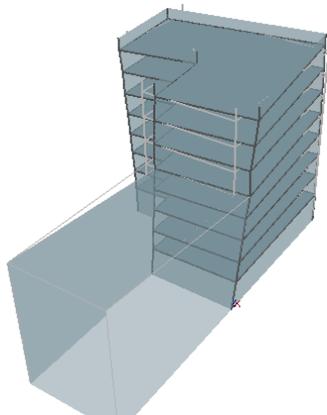
$f = 2,6 \text{ Hz}$

2º modo de vibração do modelo numérico



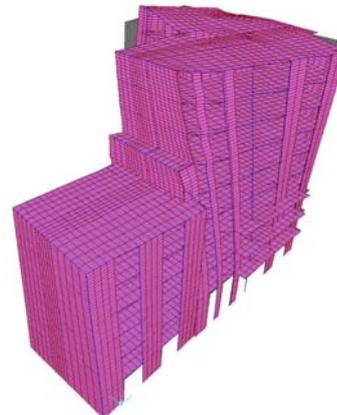
$f = 2,6 \text{ Hz}$

3º modo de vibração experimental



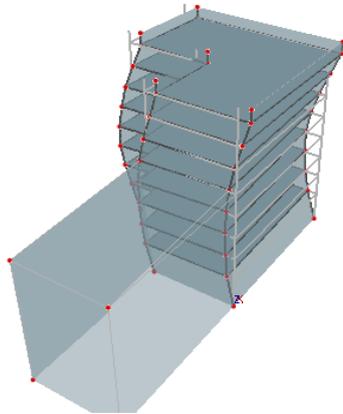
$f = 3,8 \text{ Hz}$

3º modo de vibração do modelo numérico



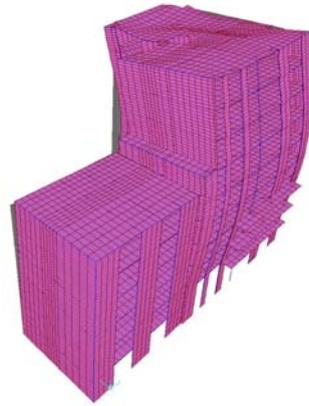
$f = 3,6 \text{ Hz}$

8º modo de vibração experimental



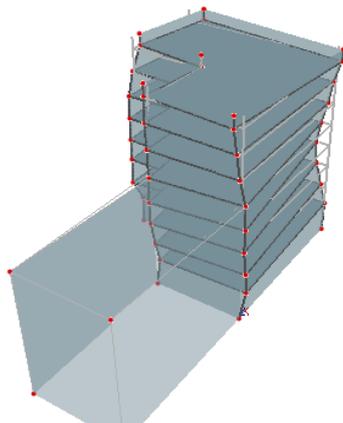
f = 7,0 Hz

6º modo de vibração do modelo numérico



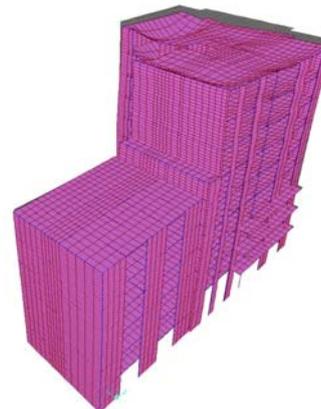
f = 7,2 Hz

10º modo de vibração experimental



f = 9,7 Hz

8º modo de vibração do modelo numérico



f = 10,0 Hz

Figura 11. Comparação entre resultados experimentais e os resultados do modelo numérico adotado após o processo de calibração.

Quadro 3. Matriz dos coeficientes MAC.

		Modos de vibração do modelo numérico				
		1	2	3	6	8
Modos de vibração experimentais	Frequências [Hz]	2,2	2,6	3,6	7,2	10
	1	2,2	88%	10%	4%	14%
2	2,6	6%	83%	2%	1%	0%
3	3,8	9%	0%	95%	0%	2%
8	7,0	4%	0%	2%	79%	23%
10	9,7	1%	5%	0%	39%	72%

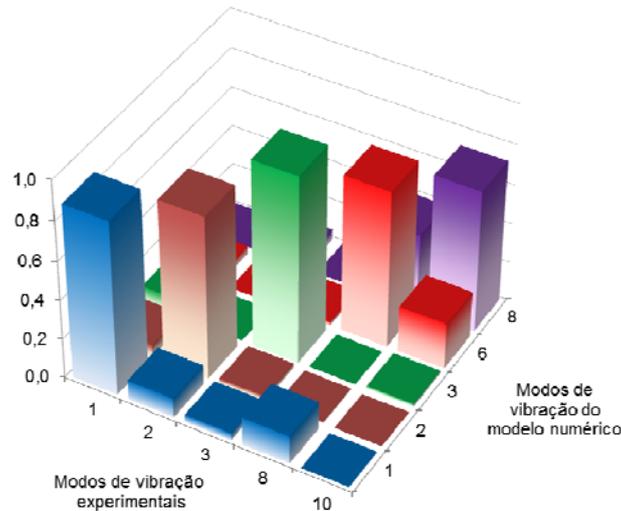


Figura 12. Representação gráfica dos coeficientes MAC.

6. ANÁLISE DE RESULTADOS

Quanto ao valor das frequências próprias e das configurações modais identificadas nos três primeiros modos de vibração verifica-se um bom acordo entre os resultados do modelo numérico e os resultados identificados experimentalmente. No entanto, relativamente ao quarto modo de vibração, verifica-se que apesar do valor de frequência obtido experimentalmente estar próximo do valor determinado numericamente, em termos da configuração modal a discrepância entre os resultados experimentais e numéricos é notória. No modelo numérico verificou-se que a configuração do 4º modo corresponde a movimentos do edifício adjacente, enquanto que experimentalmente foi detetado um modo local com expressão apenas no teto do rés-do-chão, revelando-se de difícil interpretação. Esta discrepância é explicada pelo facto do edifício adjacente não ter sido instrumentado.

É de referir que, em termos de frequências próprias, existe um bom ajuste no caso dos primeiros quatro modos de vibração, sendo que a partir do quinto modo de vibração os valores numéricos e experimentais apresentam alguma divergência.

7. CONCLUSÕES

Dadas as naturais incertezas associadas a um trabalho de identificação modal experimental em que se utiliza apenas ruído ambiente como fonte de excitação da estrutura, não garantindo que todos os modos de vibração que se obtêm com um modelo analítico, bastante refinado, sejam excitados de igual modo e com energia suficiente para ultrapassarem as naturais limitações de toda a cadeia de medição pode introduzir em termos de relação sinal-ruído, considera-se que este modelo analítico, com os valores adotados para as propriedades dos materiais e com os critérios de modelação que foram utilizados, reproduzirá com boa fidelidade o comportamento expectável desta estrutura para ações sísmicas que futuramente possam vir a acontecer.

É através do ensaio *in situ* que se consegue calibrar o modelo numérico. O objetivo desta calibração é obter um modelo numérico ao qual correspondem parâmetros da resposta dinâmica (frequências próprias, configurações modais e amortecimentos modais) idênticos aos identificados experimentalmente.

Cumprido o objetivo de calibrar o modelo numérico, o modelo resultante representa com exatidão as características dinâmicas do edifício em estudo, permitindo realizar o estudo da avaliação da segurança e posteriormente, no caso de estruturas que não cumpram os requisitos de segurança, decidir qual a técnica de reabilitação mais eficaz e economicamente mais viável para cada caso.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração da Bolseira de Experimentação Susana Almeida na execução da matriz dos coeficientes MAC.

REFERÊNCIAS

- [1] Mendes, L. & Campos Costa, A. – *LNEC-SPA, Signal Processing and Analysis Tools for Civil Engineers – Version 1.0 - Build 12*. Relatório n.º29/2007, NESDE, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 2007, Lisboa.
- [2] Carvalho, F. J., Costa, C. O. et al. – *Elementos de Sistemas e de Análise e Processamento de Sinais*. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1989, Lisboa.
- [3] Bendat, J. & Piersol, A. – “Random Data-Analysis and Measurement Procedures”. John Wiley and Sons, 1986, New York.
- [4] Corrêa, M. R. & Campos Costa, A. – “Ensaio Dinâmico da Ponte sobre o Rio Arade; Pontes Atirantadas do Guadiana e do Arade”. L. Ed. J. A. Fernandes & L. O. Santos, 1992, Lisboa.
- [5] Peeters, B. – “System Identification and Damage Detection in Civil Engineering”. Tese de Doutoramento, Catholic University of Leuven, 2000, Leuven, Belgica.
- [6] Prevosto, M. – “Algorithmes d'Identification des Caractéristiques Vibratoires de Structures Mécaniques Complexes”. Tese de Doutoramento, Université de Rennes I; 1982, Rennes, França.
- [7] Shih, C. Y.; Tsuei, T. G. et al. – “Complex Mode Indication Function and its Application to Spatial Domain Parameter Identification”. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1988, Vol. 2, N.º 4, pp. 367-377.
- [8] Brincker, R.; Zhang, L. et al. – *Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition*. Proceedings of the 18th International Seminar on Modal Analysis, 2000, San Antonio, Texas, EUA.
- [9] Rodrigues, J. – “Identificação Modal Estocástica, Métodos de Análise e Aplicações em Estruturas de Engenharia Civil”. Tese de doutoramento, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2004, Porto.
- [10] Brincker, R.; Ventura, C. et al. – *Damping Estimation by Frequency Domain Decomposition*. Proceedings of IMAC XIX, 19th International Modal Analysis Conference, 2001, Kissimmee, EUA.
- [11] Allemang, R. J. & Brown, D. L. – “A Correlation Coefficient for Modal Vector Analysis”. IMAC I, 1982, Orlando, EUA.
- [12] SAP2000 – *SAP2000 version 11.0.8 – Static and Dynamic Finite Element Analysis of Structures Advanced; Computers and Structures, Inc.* 2007, Berkeley, California, USA.
- [13] LNEC – “Análise sísmica de estruturas de edifícios segundo a nova regulamentação – Dimensionamento dos elementos estruturais de 4 edifícios”. Volumes I, II e III, ICT – Especialização e aperfeiçoamento, Estruturas, S322, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1984, Lisboa.