

VII Congresso de Mecânica Aplicada e Computacional

Universidade de Évora

14 a 16 de Abril de 2003

ANÁLISE DINÂMICA DE UM QUARTEIRÃO LOCALIZADO NA CIDADE DA HORTA – ILHA DO FAIAL

Nuno Neves¹, Aníbal Costa², António Arêde³

RESUMO

O comportamento de um edifício localizado no interior de um quarteirão, é manifestamente diferente do de um edifício situado, por exemplo, numa freguesia rural. Assim, os edifícios em banda que formam um quarteirão interactuam uns com os outros, dado que se encontram ligados entre si através das paredes meeiras que são comuns a cada par de casas. Este facto condiciona o comportamento individual de cada um de per si e o do conjunto, levando a que qualquer intervenção, feita ou a fazer num dos edifícios, tenha de ter em consideração os efeitos favoráveis ou desfavoráveis que poderá originar nos outros.

Procurando compreender esta interacção entre os elementos que o constituem, modelou-se um quarteirão da cidade da Horta - Faial e uma das casas que o compõem com vista ao estudo do seu comportamento dinâmico e sísmico. Nesta comunicação apresenta-se os principais resultados obtidos das análises dinâmicas efectuadas até ao presente.

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho integra-se no estudo dos reforços e reparações a realizar nos edifícios afectados pelo sismo ocorrido na Ilha do Faial, em Julho de 1998. A análise baseia-se no comportamento de um quarteirão (Fig. 1), situado na freguesia da Matriz, junto à Câmara Municipal da Horta e que é confinado a Sul pelo edifício dos Correios, a Norte pela Travessa da Misericórdia, a Nascente pela Rua Serpa Pinto e a Poente pela Rua Comendador Ernesto Rebelo. Para analisar e simular a resposta do quarteirão à acção de acelerogramas registados “*in-situ*” aquando da ocorrência do sismo, recorreu-se ao programa geral de análise estrutural CASTEM 2000, CEA (1990).

¹ Eng. Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, DEC, Porto.

² Professor Associado com Agregação, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, DEC, Porto.

³ Professor Auxiliar, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, DEC, Porto.

O quarteirão em estudo tem dois tipos de estruturas com comportamentos e resistências muito distintos. Enquanto uma parte é constituída por edificações pequenas e antigas de alvenaria de pedra (Fig. 2), uma outra engloba um edifício recente, dos Correios, com estrutura porticada em betão armado, e portanto com uma maior resistência (Fig. 3).

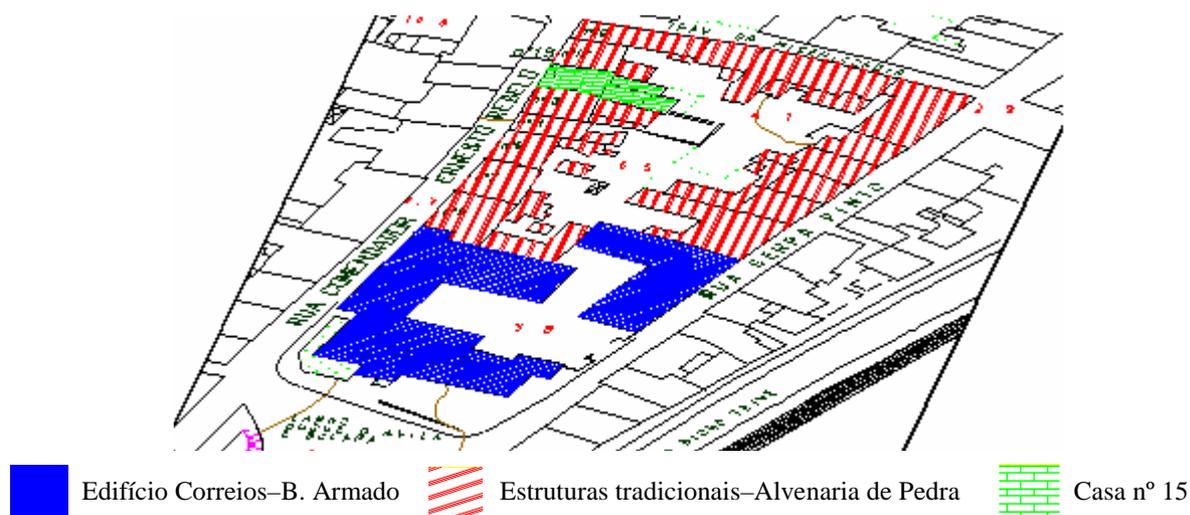


Fig. 1 - Planta de Implantação do Quarteirão

Por outro lado a forma do quarteirão, em planta e em alçado, introduz problemas estruturais de comportamento que interessa analisar. Sempre que aparecem desníveis, devidos à topografia do terreno, à cércea diferente dos prédios contíguos ou à diferença de pés direitos, materializa-se uma descontinuidade vertical que se traduz numa zona mais vulnerável.



Fig. 2- Quarteirão - Rua Comendador Ernesto Rebelo

Fig. 3- Quarteirão - Edifício dos Correios



"In all the blocks, the first and the last building are badly damaged by local collapses and large cracks" (L. Binda).

Fig. 4- Danos ocorridos num topo de um quarteirão

Os cantos ou gavetos são igualmente zonas extremamente vulneráveis, como tem sido evidenciado na sequência de diversos sismos (Fig. 4), e que alguns dos mais recentes, Açores (1980), Northridge (1994), vieram comprovar. Estes correspondem normalmente à descontinuidade mais acentuada em planta e desenvolvem-se na maioria dos casos em planos ortogonais.

Outras vezes, aparecem interrupções, pontuais ou mais duradouras, nesse desenvolvimento em planta, o que origina descontinuidades que, dependendo naturalmente da localização em planta e da sua expressão, não são geralmente tão graves como as anteriores. As traseiras dos edifícios apresentam igualmente grandes descontinuidades, sendo frequente a existência de corpos mais estreitos e compridos que se desenvolvem perpendicularmente ao tardo do edifício, introduzindo excentricidades locais e no quarteirão.

2 ANÁLISE DINÂMICA

O estudo efectuado baseou-se em dois tipos de modelações:

- modelo da casa nº15 da Rua Comendador Ernesto Rebelo e
- modelo Global do Quarteirão.

Uma vez que foram realizados ensaios *in-situ* numa das edificações pertencentes ao quarteirão (casa 15), foi feito um estudo mais minucioso dessa casa, tendo-se discretizado pormenorizadamente todos elementos constituintes: paredes, pavimentos e telhados. Desta forma, foi possível calibrar o modelo, quer ao nível dos materiais, quer ao nível dos próprios critérios de modelação por forma a obter resultados coerentes com os observados “*in-situ*”. Posteriormente, e com base nas observações dos resultados e nos critérios definidos como razoáveis para este tipo de estudo, procedeu-se à modelação global do quarteirão onde foi possível aferir o tipo de resposta global à solicitação de um sismo.

2.1 Estudo individual da casa nº 15 na Rua Comendador Ernesto Rebelo.

2.1.1 Descrição da Estrutura

A casa 15 fica situada conforme se apresenta na Fig. 5a, estando próxima de um dos cantos do quarteirão (Fig. 1). É uma moradia do tipo tradicional em banda de duas frentes constituída por dois pisos e um piso recuado com paredes meeiras a separá-la das casas vizinhas. Nas Fig. 5b a Fig. 5h estão representados pormenores com a definição geométrica da casa nº 15.

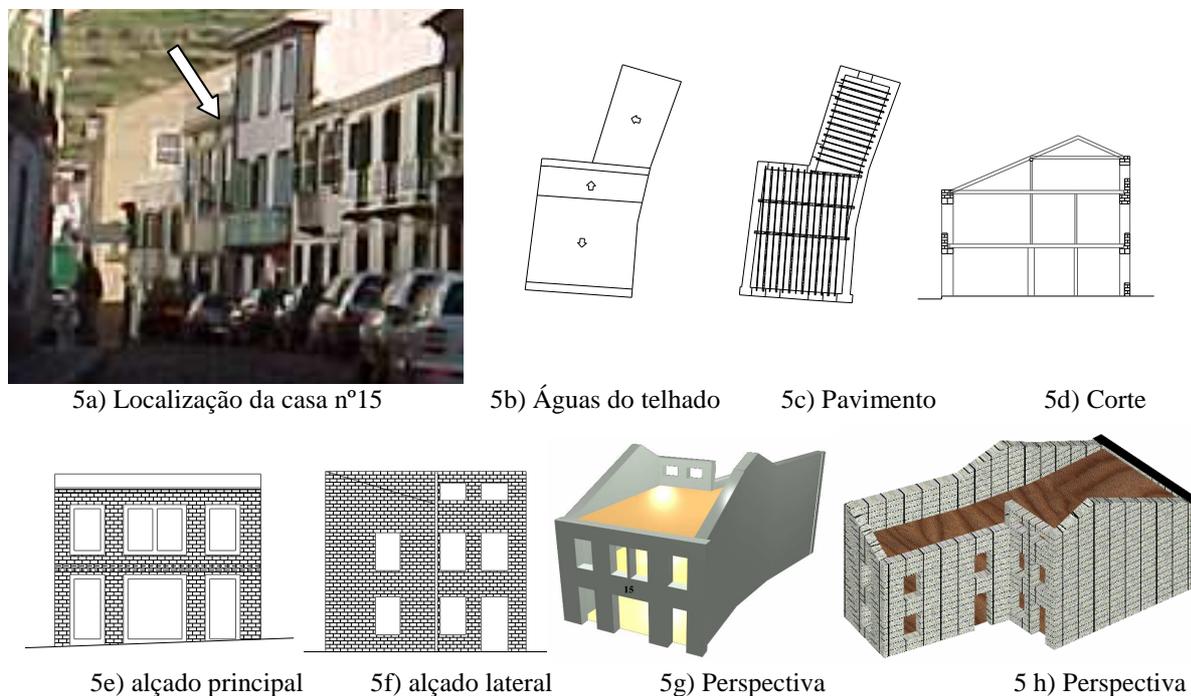


Fig. 5 - Casa nº 15. Pormenores.

A estrutura é constituída por paredes de alvenaria de pedra e os pavimentos são compostos por soalho de madeira assentes em barrotes e vigas do mesmo material que apoiam nas paredes. A alvenaria de pedra que compõe as paredes nesta casa apresenta uma grande homogeneidade e uma boa qualidade. A madeira dos elementos dos pisos é de

criptoméria (existente na região) e tem como característica principal um baixo peso volúmico. De acordo com os ensaios realizados, COSTA, A. (1999), foi possível aferir as propriedades físicas e mecânicas dos materiais conforme se apresenta na Tabela 1.

Tabela 1 – Casa nº 15 – Propriedades dos Materiais

Elemento	Material	ρ (ton/m ³)	E (GPa)	Y
Paredes	Alvenaria de pedra	1.8	1.1	0.2
Barrotes	Madeira	0.27	3.8	0.2

A modelação estrutural foi feita com base num levantamento *in-situ* das características geométricas de todos os elementos estruturais constituintes da habitação.

2.1.2 Análise Numérica

A estrutura da casa 15 foi discretizada através do método dos elementos finitos com recurso ao programa CASTEM 2000 (CEA 1990), tendo-se utilizado elementos de casca de três nós para modelar as paredes e elementos de barra de dois nós para os barrotes e vigas de madeira. Foram modelados todos os elementos estruturais que poderiam condicionar o comportamento estrutural da estrutura.

Dado que um dos objectivos do trabalho é avaliar convenientemente a influência do efeito “conjunto” no comportamento sísmico das estruturas existentes, foram então consideradas duas hipóteses de modelação:

-  modelação A – A estrutura da casa foi tratada como um elemento isolado, não tendo em linha de conta o efeito das edificações vizinhas (Fig. 6).
-  modelação B – Foram considerados todos os elementos da casa em estudo incluindo também elementos estruturais das habitações vizinhas (Fig. 7).

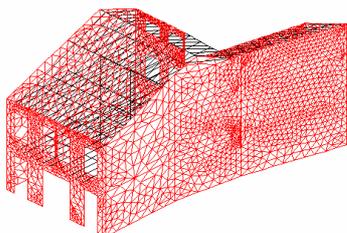


Fig. 6 - Modelação A

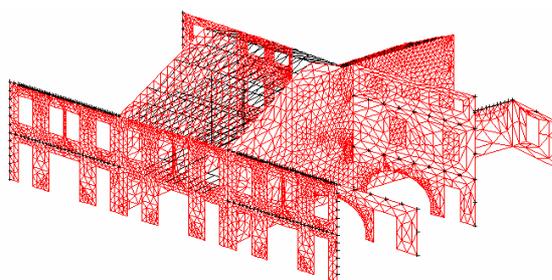


Fig. 7 - Modelação B

Os dois modelos da casa são semelhantes no que se refere aos elementos que a constituem, com a diferença de que, num dos casos (B) foi considerada, de uma forma simplificada, a existência de habitações contíguas. Neste caso, foram modelados os elementos verticais das habitações que pareceram relevantes para influenciar a resposta da estrutura. Esta primeira análise reveste-se de um carácter qualitativo já que são admitidas algumas simplificações, quer ao nível de apoios, quer ao nível das cargas dos elementos “vizinhos”. É importante realçar que apenas é possível tirar conclusões do efeito conjunto na direcção longitudinal do quarteirão na qual os elementos considerados têm uma influência muito grande. Na direcção transversal, o efeito não pode ser (neste caso) adequadamente

avaliado uma vez que, para simplificação, as paredes do grupo foram travadas na direcção perpendicular ao seu desenvolvimento.

Para cada uma das referidas hipóteses de modelação (A e B), foram calculadas as frequências e os respectivos modos de vibração, cuja análise permite interpretar e avaliar a influência do efeito de grupo na resposta global à solicitação sísmica.

Para além desta análise da influência do efeito conjunto no comportamento sísmico, houve necessidade de calibrar convenientemente o comportamento dos pavimentos que, pela sua constituição suscitava algumas dúvidas sobre a modelação mais adequada. Em ambas as modelações (A e B) os pavimentos foram modelados com as suas vigas principais e barrotes. Para a simulação do soalho apenas foram consideradas barras auxiliares de reduzida inércia a ligar os vários barrotes que constituíam os pisos para assim se homogeneizar as deformações dos pavimentos.

A adequada interpretação do efeito do soalho na estrutura e a validação do seu modelo numérico originou uma terceira modelação (C) (Fig. 8) que teve por base a modelação B mas que incluía elementos de laje de muito reduzida espessura. Em qualquer dos casos os elementos do *soalho* apoiam nos barrotes e nas vigas principais mas não são ligados às paredes de pedra resistentes.

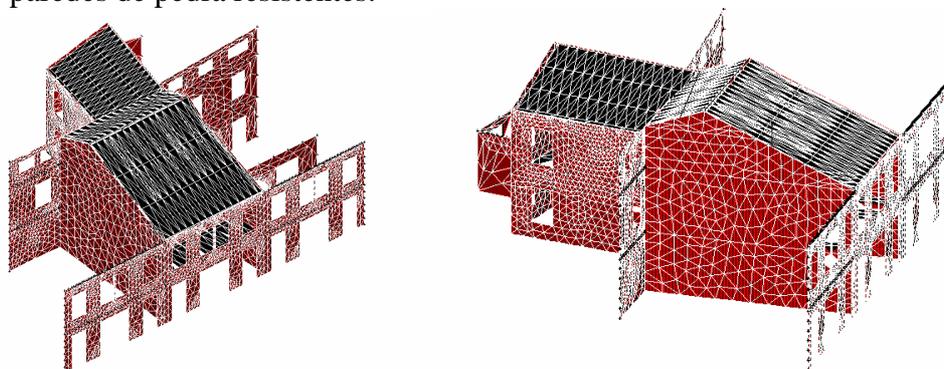


Fig. 8 - Modelação C

A solicitação sísmica a considerar é caracterizada pelos acelerogramas registados a 9 de Julho de 1998 ao nível das fundações do Observatório Príncipe de Mónaco, situado na cidade da Horta, ilha do Faial, com distância epicentral da ordem dos 10 a 15 km. Para as três componentes do referido registo sísmico, que apresenta o valor máximo da aceleração igual a 360 cm/s^2 numa das direcções horizontais, foram obtidos os correspondentes espectros de potência ilustrados na Fig. 9.

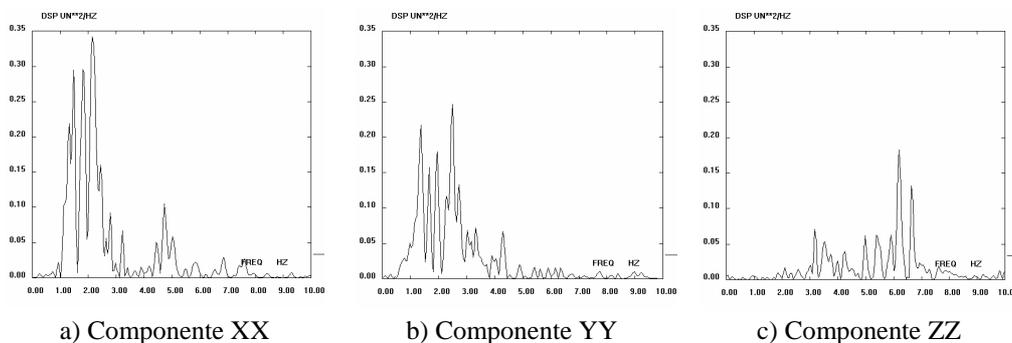


Fig. 9 - Densidades espectrais de potência das componentes do sismo de 9 de Julho de 1998.

Daquelles espectros de potência verifica-se que as componentes horizontais (XX e YY) do sismo são mais ricas na gama de frequências entre cerca de 1 e 2.5 Hz enquanto que

a componente vertical (ZZ) é mais intensa entre 6 e 7 Hz. Devido ao conteúdo espectral para as frequências relativamente elevadas (superiores a 2Hz), este sismo pode ser associado à acção regulamentar tipo 1 que caracteriza uma magnitude moderada a pequena distância focal (sismo próximo).

No presente estudo, a direcção XX foi tomada coincidente com o eixo longitudinal do quarteirão. Com base nestes valores e comparando-os com as frequências próprias da estrutura foi possível fazer uma previsão do tipo de resposta e também averiguar quais os modos que mais a podem influenciar.

No âmbito das análises estruturais em curso, a resposta sísmica é obtida em regime linear elástico por integração no domínio do tempo através do método de Newmark, considerando amortecimento estrutural viscoso segundo a formulação de Rayleigh (proporcional às matrizes de massa e de rigidez) calibrado de modo a garantir que o coeficiente de amortecimento não ultrapasse 5% na gama de frequências de interesse para as componentes horizontais e verticais. No entanto, na presente comunicação não são ainda apresentados quaisquer resultados relativos a tais análises sísmicas.

2.1.3 Análise dos Resultados

A análise dos resultados modais permite-nos avaliar a importância do efeito de grupo na resposta das edificações à acção de um sismo. Na Tabela 2 apresentam-se as características dos modos principais de cada uma das modelações, nomeadamente o valor das suas frequências, direcção fundamental e percentagem da massa global efectiva mobilizada a cada modo. Este último valor permite avaliar, para cada direcção, a importância de cada modo na resposta global da estrutura já que fornece a medida das forças de inércia que potencialmente se mobilizam em caso de sismo.

Tabela 2 – Casa nº 15 – Resultados Modais

Modelação A			Modelação B			Modelação C		
Modo N.º	Freq. (Hz)	Massa efectiva % -- direcção	Modo N.º	Freq. (Hz)	Massa efectiva % -- direcção	Modo N.º	Freq. (Hz)	Massa efectiva % -- direcção
1	2.75	50 – xx	1	3.96	32 - xx	10	6.30	63 - xx
7	5.85	13 – xx	8	6.80	12 - xx	--	--	--
15	8.01	12—yy	10	7.29	10 - xx	--	--	--
20	8.65	26 – yy	20	9.6	23.2 - yy	--	--	--

A alternância do número do modo de vibração, deve-se ao facto de existirem modos locais associados a deformações dos pavimentos que, pelas suas características, quer da massa quer da rigidez, têm frequências de vibração semelhantes e intercaladas com os valores representados. Estes modos põem ter um papel importante local ao nível do elemento, mas não constituem factor condicionante para a caracterização da resposta global.

Comparando as modelações A e B (Tabela 3) podemos observar que a introdução das paredes das casas adjacentes se traduziu num aumento no valor das frequências próprias da estrutura na direcção longitudinal ao quarteirão. Relativamente à direcção transversal, pode-se observar que em ambas as modelações as frequências de vibração são mais elevadas.

Tabela 3 – Casa nº 15 – Modos de Vibração

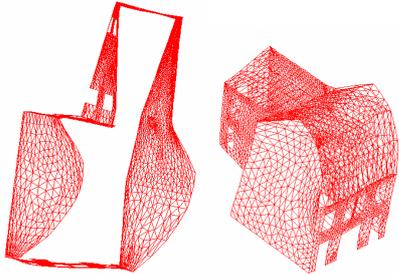
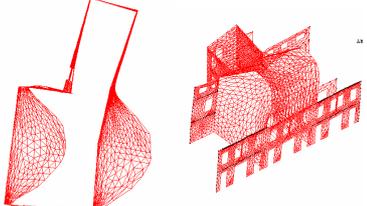
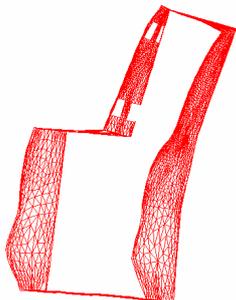
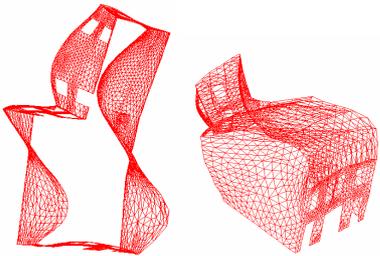
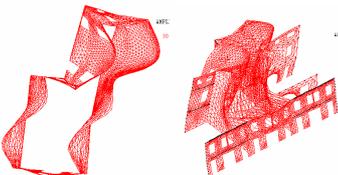
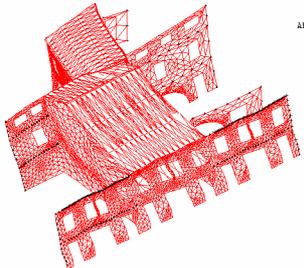
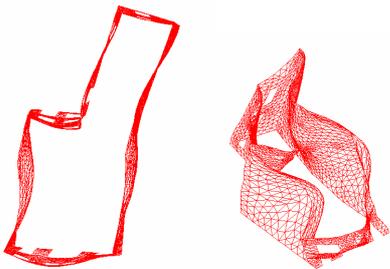
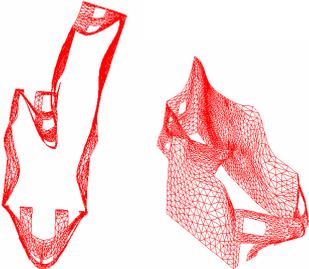
Modelação A	Modelação B	Modelação C
 <p>Modo nº 1 – 2.75 Hz</p>	 <p>Modo nº 1 – 3.96 Hz</p>	
 <p>Modo nº 7 – 5.85 Hz</p>	 <p>Modo nº 8 – 6.80 Hz</p>	
 <p>Modo nº 20 – 8.65 Hz</p>	 <p>Modo nº 20 – 9.60 Hz</p>	<p>Modo nº 10 – 6.30 Hz</p>



Fig. 10 - Pormenor dos Pavimentos

A modelação C evidencia que a inclusão dos elementos de casca conferiram uma rigidez bastante grande aos pisos. Este fenómeno está bem patente na diferença dos valores das frequências dos primeiros modos das modelações B e C. Enquanto no primeiro caso(B) as paredes meeiras apresentam flexão em torno de um eixo vertical, no segundo (C) este fenómeno não é visível pois a casca funcionando como um diafragma rígido, restringe a deformação no seu próprio plano, aumentando assim a rigidez da estrutura e as suas frequências.

Os valores das frequências de vibração, resultantes da campanha preliminar de medições experimentais “*in-situ*”, aproximam-se da modelação B sendo possível afirmar que o soalho (Fig. 10) constituinte dos pavimentos não mobilizam o efeito de um diafragma rígido no seu plano. Apesar de constituírem no seu todo, um elemento de grande rigidez no plano, as ligações nele existentes, quer associadas às vigas em que apoiam, quer associadas aos elementos que o compõem, não garantem o comportamento acima mencionado.

A modelação B apresenta-se assim como a melhor opção estudada para representar a resposta dinâmica da estrutura.

2.2 Estudo Global do Quarteirão

2.2.1 Descrição da Estrutura

Conforme foi referido, o quarteirão (Fig. 11) é composto por dois tipos de edificações, um tradicional com casas do tipo de habitação com dois ou três pisos e outro correspondente a um edifício em betão armado. A rua Serpa Pinto está a uma cota inferior da rua Comendador Ernesto Rebelo, facto este que foi considerado na modelação. Este quarteirão está compreendido numa área de cerca de 8400m².

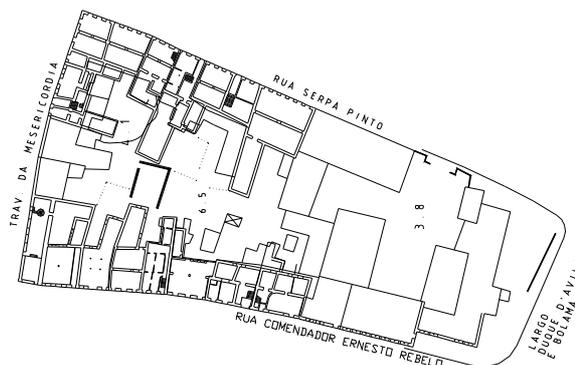


Fig. 11 - Quarteirão - Planta

2.2.2 Análise Numérica

Após a calibração das propriedades mecânicas dos materiais, e dos critérios de modelação de acordo com o estudo individual da casa 15, procedeu-se ao estudo global do quarteirão no qual se avaliou, por um lado o seu comportamento global e, por outro, a influência da existência do edifício dos correios num dos seus extremos. Este, devido à sua localização e grande rigidez pode de facto condicionar o tipo de comportamento conjunto, afastando o centro de rigidez do centro de massa e gerando assim importantes excentricidades que vão agravar o efeito do sismo nas construções de alvenaria em resultado do efeito de torção. Um outro aspecto que merece particular atenção é o das características da interface entre as casas e o edifício de betão. Ao contrário do que acontece nas casas de alvenaria onde existem paredes meeiras, neste caso encontra-se uma junta de dilatação entre as duas estruturas o que por si só é um factor importante para a caracterização da resposta. Para avaliar este tipo de influência optou-se então por proceder a dois tipos de modelação:

- ☞ Modelação A – Modelo Global do Quarteirão com o edifício dos correios (Fig. 12).
- ☞ Modelação B – Modelo Global do Quarteirão sem o edifício dos correios (Fig. 13).

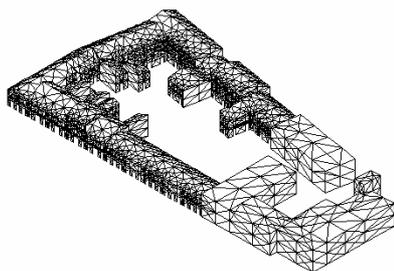


Fig. 12 - Modelação A

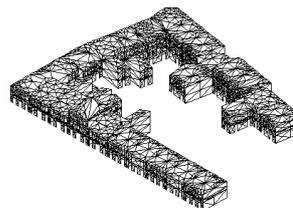


Fig. 13 - Modelação B

Em ambas as modelações recorreu-se ao programa já anteriormente referido e todos os elementos foram simulados com elementos de casca. Com base no cálculo dos modos de vibração foi possível compreender o comportamento global do quarteirão e também avaliar a influência do edifício de betão. Os materiais foram considerados com as propriedades mecânicas definidas na casa 15. O comportamento dos pavimentos foi modelado com elementos de casca, uma vez que a simulação das vigas principais e dos barrotes torna-se incompatível com a dimensão do quarteirão. Tal como havia acontecido com o estudo individual da casa 15 este tipo de elemento aumenta significativamente as frequências próprias, pelo que está em fase de estudo outro tipo de simulação que, sendo compatível com a dimensão do modelo garanta resultados aceitáveis. Deste modo, os resultados apresentados traduzem apenas as configurações modais do quarteirão, que traduzem o seu comportamento dinâmico.

2.2.3 Análise dos Resultados

Dos resultados obtidos da modelação A (Fig. 14) pode-se concluir o seguinte:

O 1º modo está associado a um movimento importante do gaveto para fora do plano, enquanto que o 2º e 3º modos correspondem ao movimento do edifício do canto da Travessa da Misericórdia com a Rua Serpa Pinto nas direcções transversais e longitudinais.

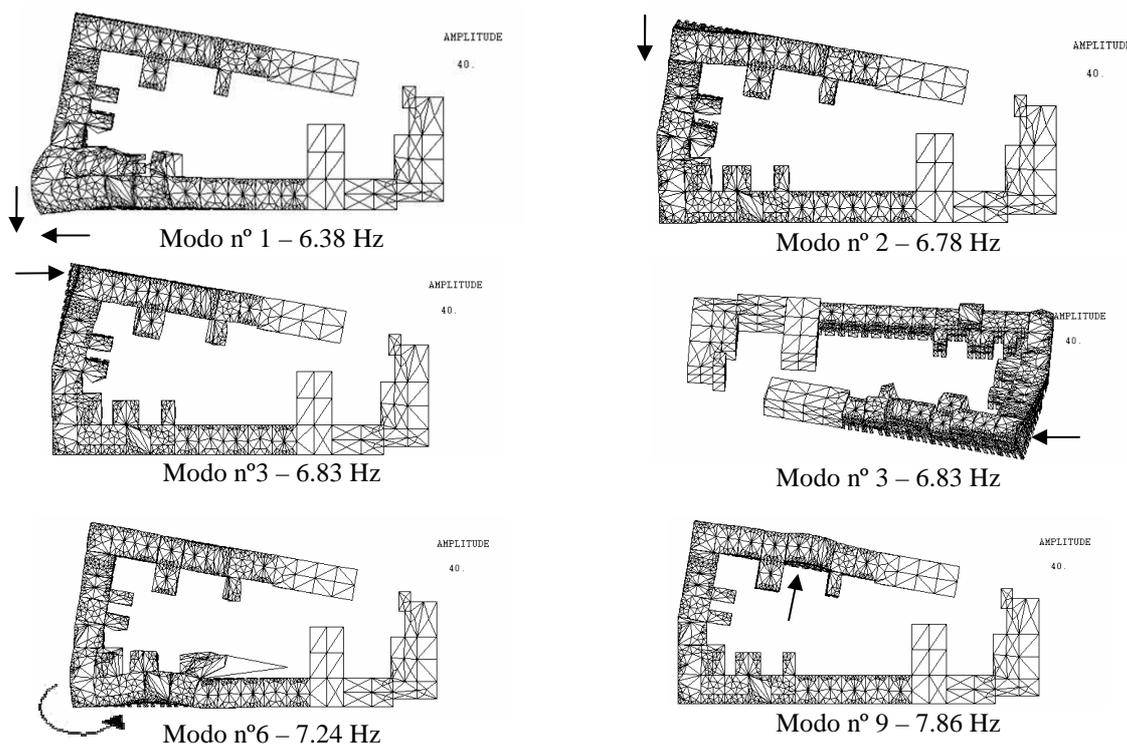


Fig. 14 – Quarteirão Modelação A – Modos de Vibração

O 6º modo traduz o “*embarrigamento na direcção transversal*” de algumas casas da Rua Comendador Ernesto Rebelo, nas quais está incluída a casa 15 e inclui um efeito de torção no canto. O 9º modo traduz a irregularidade em altura de dois edifícios mais altos da Rua Serpa Pinto a meio do alinhamento dessa rua.

É interessante observar que a frequência do primeiro modo de vibração do quarteirão é semelhante ao modo fundamental da modelação C da casa nº 15, o que por um lado, valida as simplificações efectuadas nas modelações Be C para simular o efeito de grupo, e por

outro, reflecte (tal como na modelação C da casa 15) a influência dos pavimentos na resposta da estrutura global.

Comparando os modos de cada uma das modelações (A–Fig. 14; B–Fig. 15) é possível avaliar o efeito do edifício de betão no comportamento global da estrutura.



Fig. 15 – Quarteirão Modelação B – Modos de Vibração

No primeiro modo não são perceptíveis grandes variações entre as duas modelações, uma vez que a zona mobilizada não sofre qualquer influência pela existência do bloco de betão. Já o segundo modo (B) pode ser comparado ao 3º modo (A) com o primeiro a corresponder a uma frequência um pouco mais baixa. Este facto é explicado pela diminuição da rigidez global naquela direcção, o que faz diminuir a frequência. Assim, podemos observar que, enquanto na modelação A o 2º modo corresponde a uma deformação perpendicular à Rua Serpa Pinto, na modelação B se verifica uma deformação paralela à mesma. Em fase subsequente proceder-se-á à colocação de elementos de junta entre as estruturas tradicionais de pedra e a estrutura em betão armado por forma a simular o comportamento conjunto dos dois tipos de construção.

3 CONCLUSÕES

O presente estudo representa uma fase preliminar de um trabalho mais vasto que diz respeito a um quarteirão específico da Cidade da Horta, com o qual se procura compreender o comportamento dinâmico, e perceber os factores mais condicionantes para a sua caracterização. Embora algumas das conclusões a tirar deste caso com particularidades próprias possam servir para outros quarteirões e até para outros locais, deve-se sempre ter presente que no domínio da Engenharia Sísmica cada caso é um caso e que situações particulares podem alterar totalmente o comportamento global. Também é importante salientar que a acção sísmica tem a particularidade de detectar todos os defeitos que são praticados aos diversos níveis da execução de um edifício, desde a concepção, passando pelo projecto, execução, reparações e reforços.

Assim, uma das conclusões que se pode, desde já, tirar deste estudo é a de que o comportamento de um edifício enquadrado num quarteirão é influenciado pela forma do quarteirão e pelos tipos estruturais dos edifícios que o compõem. Outra conclusão é de que as irregularidades, em altura e em planta, dão origem a zonas vulneráveis que interessa ter em conta quando se procede a obras de reforço e reparação. Os gavetos são as zonas mais vulneráveis dos quarteirões sendo indispensável reforçá-los de modo a prevenir os danos que podem ocorrer nos edifícios aí situados.

4 REFERÊNCIAS

- COSTA, A., (1999), *Ensaio de Caracterização de Alvenarias Tradicionais*. M.M. – Lda - Porto
CEA (1990), *CASTEM 2000, Guide d'utilisation*, CEA, France.
BINDA, L., “*Repair and strengthening of historic Masonry Buildings in seismic areas*”.