

Análise sísmica de um quarteirão

Seismic analysis of a building block

Nuno Neves⁽¹⁾, António Arêde⁽¹⁾, Aníbal Costa⁽²⁾

⁽¹⁾ Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, ⁽²⁾ Universidade de Aveiro

Abstract

The following paragraphs report on the study of the seismic response of a urban building block in Faial, Azores, located in Horta downtown, next to the Town Hall. The work fits within the framework of studying strengthening schemes suitable for the reconstruction process of a town damaged by an earthquake action and includes numerical modelling of all the block buildings with calibration of material/structural parameters based on ambient vibration tests. The study aims at understanding a number of issues likely to influence the global block behaviour and the local response of individual houses, namely the group effect of adjacent buildings, the in-plan stiffness of floors and/or roofs and the presence of localized strengthening interventions in selected zones of the block.

1. Introdução

Os edifícios de 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 aspecto condiciona o comportamento individual de cada um de per si e o do conjunto, originando que qualquer intervenção que se faça num dos edifícios terá de ter em consideração os efeitos favoráveis ou desfavoráveis que poderá originar nos outros. Por outro lado, a forma

em planta e em alçado do quarteirão introduz problemas estruturais de comportamento que interessa analisar. Sempre que aparecem desníveis, devidos à topografia do terreno, à cêrcea diferente dos prédios contíguos ou à diferença de pés direitos, existe uma descontinuidade vertical que se traduz numa zona mais vulnerável. Os cantos ou gavetos do quarteirão são zonas extremamente vulneráveis, assim como as traseiras dos edifícios, sendo frequentes a existência de corpos mais estreitos e compridos que se desenvolvem perpendicularmente ao tardo do edifício, introduzindo excentricidades locais e no quarteirão.

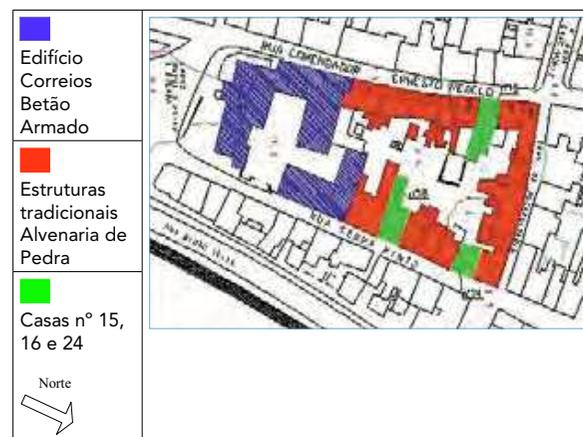
A disponibilização de poderosos meios de cálculo, baseados no método dos elementos finitos, possibilita modelações estruturais capazes de traduzir, com apreciável aproximação, o comportamento deste tipo de estruturas. De facto, mais do que a adopção dum modelo computacional adequado, as principais dificuldades acabam por surgir ao nível da caracterização dos materiais constituintes, nomeadamente no que se refere à resistência e deformabilidade, devido à heterogeneidade dos materiais e às técnicas de construção usadas nas estruturas antigas (em particular nas de alvenaria de pedra). Assim, para além das análises numéricas propriamente ditas, é importante obter uma descrição mais ou menos detalhada da constituição da estrutura mediante o estudo de elementos documentais existentes, a realização de cuidadas inspecções para avaliação "in situ" do tipo e características da estrutura, bem como identificação de danos e de zonas

Figura 1
Planta de implantação do
quarteirão.

de deficiente funcionamento estrutural. A avaliação das características dos materiais com recurso a ensaios “in situ” e de laboratório sobre amostras colhidas no local constitui uma preciosa, e mesmo indispensável, contribuição para o sucesso da análise.

2. Descrição do quarteirão

O quarteirão em estudo situa-se na freguesia da Matriz, junto à Câmara Municipal da Horta, na Ilha do Faial, tendo a Sul o edifício dos correios, a Norte a Travessa da Misericórdia, a Este a Rua Serpa Pinto e a Oeste a Rua Comendador Ernesto Rebelo (Figura 1). Apresenta dois tipos diferentes de edifícios com comportamentos dinâmicos distintos, nomeadamente construções tradicionais de alvenaria de pedra na generalidade do quarteirão e uma estrutura porticada de betão armado no edifício dos correios (Figura 2). Na Figura 1 representam-se igualmente três casas (nº 15, 16 e 24), também construções tradicionais em alvenaria de pedra, que serão estudadas mais em pormenor neste trabalho. O quarteirão apresenta um desenvolvimento ao longo da Rua Comendador Ernesto Rebelo de cerca de 141 m e uma largura média de cerca de 62 m.



Observa-se também a existência de cantos, gavetos e de corpos mais estreitos e compridos nas traseiras dos edifícios, introduzindo descontinuidades estruturais em planta, responsáveis por excentricidades locais e globais no quarteirão, e que constituem zonas extremamente vulneráveis, como tem sido evidenciado na sequência de diversos sismos, como por exemplo o sismo de 1980 nos Açores (Oliveira *et al.*, 1980). Por sua vez, as Figuras 2 a) e b) realçam alguns dos desníveis existentes no quarteirão, devidos à topografia do terreno ou às diferentes cêrceas dos prédios contíguos ou ainda à diferença de pés direitos; tais desníveis materializam descontinuidades verticais importantes que originam também uma acrescida vulnerabilidade sísmica das estruturas envolvidas.

A modelação do quarteirão foi baseada nos levantamentos arquitectónicos efectuados no âmbito do Processo de Reconstrução, que permitiram o acesso às peças desenhadas e ao levantamento dos danos de cada uma das casas do quarteirão. A informação contida nos levantamentos arquitectónicos era manifestamente insuficiente para um trabalho desta natureza, por isso foi decidido seleccionar três casas, que servissem de referência e permitissem tirar ilações sobre os modelos numéricos a implementar para as outras construções e também sobre as características geométricas e mecânicas a usar.

As construções seleccionadas foram a casa nº15 da Rua Comendador Ernesto Rebelo e as casas nº 16 e nº 24 da Rua Serpa Pinto (Figura 3). Estas casas foram seleccionadas com base na sua localização e tipologia, sendo a casa nº 16 representativa dos problemas de heterogeneidades em altura e a casa nº 24 representativa dos problemas dos cantos e gaveto. A casa nº 15 foi seleccionada uma vez que já havia sido alvo de um estudo anterior (Neves, 2004) e localizava-se igualmente perto de um gaveto (Figura 1).



a) Rua Comendador Ernesto Rebelo



a) Casa nº 15



b) Rua Serpa Pinto



b) Casas n.ºs 16 e 24



c) Edifício dos Correios



c) Casa nº 24

Figura 2
Quarteirão.

Figura 3
Edifícios sujeitos a análise.

3. Modelação estrutural, ensaios dinâmicos e calibração dos modelos numéricos

As estruturas das casas foram discretizadas através do método dos elementos finitos com recurso ao programa CAST3M (CEA, 2003), tendo sido utilizados 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 das casas. Numa segunda fase e para, por um lado, evitar o número exagerado de elementos de barra que eram necessários para simular todos os elementos de madeira existentes nas diferentes casas do quarteirão e por outro, para procurar representar o efeito do soalho de madeira, procurou-se simular os pavimentos através de elementos de casca, procurando-se calibrar a espessura a usar para representar de uma forma adequada o comportamento das casas.

Em relação aos materiais foram consideradas as propriedades físicas (massa específica ρ) e mecânicas (módulo de elasticidade E e coeficiente de Poisson ν) em concordância com resultados de ensaios descritos em Costa (1999).

Neste tipo de trabalhos é fundamental a calibração dos modelos numéricos a partir de ensaios efectuados nas casas que permitam comparar alguns parâmetros dinâmicos (normalmente frequências e modos de vibração) com os resultados numéricos.

Para a calibração dos modelos numéricos foram realizados ensaios dinâmicos nas casas referenciadas na Figura 1, (edifício dos correios e casas 15, 16 e 24) através do uso de cinco sismógrafos em cada estação de medida, dois dos quais funcionaram como sismógrafos de referência. A sua localização em cada uma das casas foi adequadamente estudada, por um lado com base nos resultados de modelações numéricas preliminares já efectuadas, e por outro adequando as condições existentes às acessibilidades no local para o que foi determinante a disponibilidade demonstrada pelas populações que se mostraram receptivas

à execução dos ensaios. Foram assim obtidos registos dinâmicos nas casas nº 15, 16 e 24, a partir dos quais foi possível aferir e calibrar os modelos numéricos entretanto desenvolvidos, conforme se mostra na Figura 4.

No processo de calibração avaliaram-se as características mecânicas das paredes, associadas à sua qualidade e ao seu grau de conservação, e as características mecânicas dos pavimentos, nomeadamente o seu funcionamento no plano. Uma das principais dificuldades existentes neste tipo de problemas e estudos é avaliar convenientemente o comportamento dos pavimentos quando a estrutura em que se encontram é submetido a esforços horizontais, nomeadamente o sismo. A rigidez dos pavimentos no seu plano condiciona o comportamento da estrutura global, nomeadamente na sua rigidez e na distribuição de tensões nos elementos verticais (paredes). Para cada uma das casas foram calibrados estes dois parâmetros, cujos resultados se apresentam nas Figuras 5 a 7 (Neves, 2004). Atente-se que a rigidez dos pavimentos é traduzida na espessura dos elementos de casca utilizados nos modelos numéricos. Uma espessura de 0,15 cm está associada à inexistência de qualquer funcionamento de diafragma dos pavimentos, tendo sido calibrada por comparação com o modelo da mesma casa mas em que os pavimentos são modelados apenas com os barrotes primários e secundários. O soalho das casas tem na realidade aproximadamente 2,5 cm de espessura (1") pelo que a consideração deste valor para a espessura dos elementos de casca conduz ao eventual funcionamento do soalho como uma "laje" uniforme, contínua e rígida no seu plano. Os valores intermédios traduzem uma diminuição da rigidez do soalho associado à sua constituição e à interligação dos elementos (tábuas) que o constituem. Estes valores intermédios são naturalmente artifícios de cálculo mas que permitem avaliar de uma forma qualitativa o grau de eficiência dos elementos constituintes dos pavimentos, tendo-se adoptado o valor de 1,5cm que

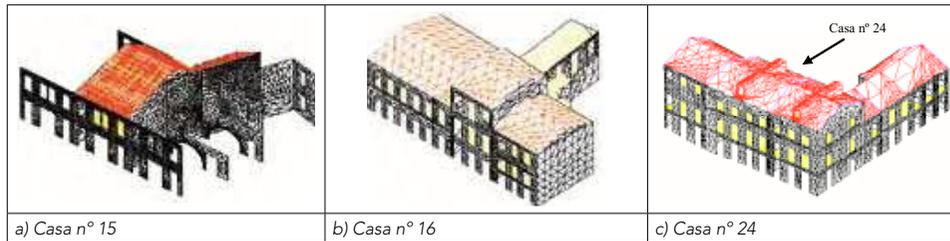


Figura 4
Modelos numéricos.



Figura 5
Casa nº 15 - Modelo numérico final ($E_{\text{par}} = 650\text{ MPa}$; $\text{esp}_{\text{pav}} = 1.5\text{ cm}$) e sua comparação com o modelo experimental.

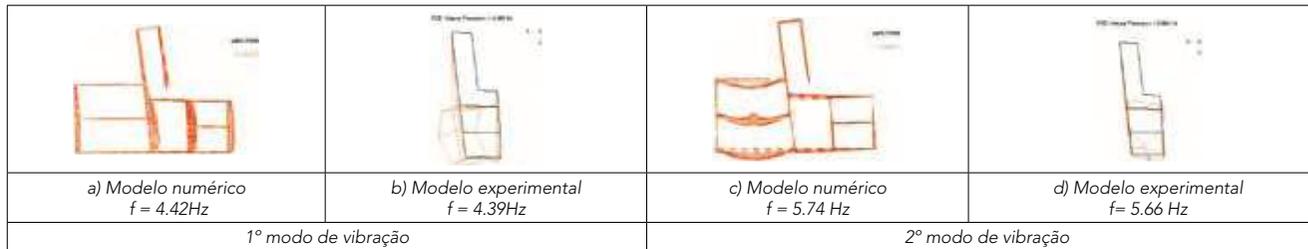


Figura 6
Casa nº 16 - Modelo numérico final ($E_{\text{par}} = 800\text{ MPa}$; $\text{esp}_{\text{pav}} = 1.5\text{ cm}$) e sua comparação com o modelo experimental.

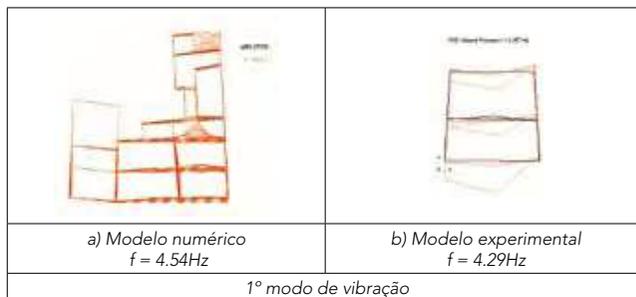


Figura 7
Casa nº 24 - Modelo numérico final ($E_{\text{par}} = 800\text{ MPa}$; $\text{esp}_{\text{pav}} = 1.5\text{ cm}$) e sua comparação com o modelo experimental.

se verificou contribuir para uma boa aproximação entre modos e vibração numéricos e experimentais conforme se evidencia nas Figuras 5 a 7.

4. Análises dinâmicas e sísmicas

Assumindo-se como correctas as propriedades mecânicas das paredes resultantes dos ensaios experimentais, fez-se o estudo sísmico recorrendo aos modelos numéricos calibrados e a outros que, com base naqueles, poderiam simular de uma forma mais correcta o comportamento das estruturas quando sujeitas a grandes acelerações, tendo em conta a variabilidade e heterogeneidade dos materiais constituintes, parametrizando algumas variáveis como a rigidez dos pisos, o efeito conjunto do quarteirão e as próprias características mecânicas das paredes mestras.

Para além da análise sísmica efectuada para as condições calibradas com base nos resultados dos ensaios "*in situ*", fizeram-se alguns estudos comparativos, quer de tensões quer de deslocamentos, que visam avaliar as alterações do comportamento das estruturas associadas ao deficiente comportamento dos soalhos e à eventual inexistência de efeito de grupo.

Neste contexto, analisaram-se numericamente as casas em estudo que foram submetidas aos ensaios "*in situ*". Procurou-se para cada uma delas avaliar e localizar os pontos mais frágeis onde estão instaladas as maiores tensões assim como avaliar a amplitude de deformações impostas a cada uma das estruturas de forma a quantificar o grau de potenciais danos ocorridos ou que poderão ocorrer no futuro. Para analisar e simular a resposta do quarteirão à acção de acelerogramas registados "*in situ*" aquando da ocorrência do sismo, recorreu-se ao programa de análise estrutural CAST3M (CEA, 2003).

4.1. Acções consideradas no estudo

4.1.1. Acções verticais

As acções verticais consideradas foram quantificadas de acordo com os valores descritos no Quadro I.

Quadro I – Acções consideradas

Peso das paredes	Peso da madeira	Cargas Permanentes	Sobrecarga
18 kN/m ³	2,7 kN/m ³	0,5 kN/m ²	2,0 kN/m ²

Neste trabalho foram analisados os efeitos da acção sísmica no quarteirão, tendo sido adoptadas na análise numérica as cargas verticais e a acção do sismo. Em concordância com os preceitos regulamentares habituais, a massa mobilizada para a acção do sismo corresponde às combinações quase permanentes de acções, isto é a $G + \psi_2 \times Q$, onde G e Q representam as acções permanentes e a sobrecarga e ψ_2 o coeficiente de combinação que foi tomado com o valor de 0,4.

4.1.2. Acção sísmica

Atendendo a que se tratam de construções que foram afectadas por um sismo, assume particular interesse a realização da análise sísmica com base naquela acção específica uma vez que permite fazer um confronto dos resultados numéricos com os efeitos reais daquele sismo sobre os edifícios do quarteirão e assim, conseguir uma forma adicional de validação das condições adoptadas na modelação.

Neste contexto, a acção sísmica considerada caracteriza-se 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 (Oliveira *et al.*, 1998).

Analisando a localização do quarteirão na carta dos solos para a ilha do Faial (Forjaz *et al.*, 2000) verifica-se que se trata de uma zona de solos tipo 1 cuja aceleração máxima pode atingir 177 cm/s². Para a cidade da Horta este valor corresponde a um sismo com um período de retorno de cerca de 200 anos

(Carvalho *et al.*, 2001). Deste modo, e atendendo à localização do observatório a uma altitude mais elevada com conseqüente amplificação dos valores da aceleração registados, para a generalidade das análises sísmicas efectuadas neste trabalho, os registos obtidos foram escalados por forma a que a aceleração máxima global seja de cerca de 180 cm/s².

4.2. Enquadramento regulamentar

No decorrer das análises efectuadas tentou-se analisar alguns dos resultados à luz de preceitos regulamentares, pelo que se apresentam de seguida algumas imposições regulamentares para este tipo de estruturas.

Uma das quantidades que deve ser analisada neste tipo de estruturas é o deslocamento relativo correntemente designado na literatura anglo-saxónica por "inter storey drift" e que daqui em diante será designado apenas por "drift". Este parâmetro fornece uma medida muito útil dos danos ocorridos entre pisos a que se refere, e é avaliado através da diferença de deslocamentos entre dois pisos consecutivos dividida pela altura entre os mesmos pisos; exprime-se geralmente em %. Refira-se a título de exemplo a norma FEMA-356/357 (FEMA, 2000), baseada num conjunto de linhas de acção e de análises que para estruturas de alvenaria divide o dano associado ao "drift" entre pisos em três níveis aos quais associam as condições de utilização dos edifícios.

- 0.1% - Corresponde à ocorrência de fissurações visíveis mas que não compromete a utilização do edifício, estando-lhe associado a um estado de ocupação imediata.
- 0.6% - Corresponde a um avançado estado de degradação do edifício a partir do qual fica comprometida a segurança dos utilizadores.
- 0.8% - Corresponde a um estado de pré-colapso.

Um dos factores essenciais numa análise sísmica é o coeficiente de comportamento que, de acordo com o EC8 (CEN, 2003), pode variar tal como indicado no Quadro II. Este valor permite ter em conta o grau de não linearidade da estrutura, uma vez que a análise foi efectuada no domínio elástico.

Quadro II – Coeficientes de comportamento em estruturas de alvenaria

Tipo de alvenaria	Coeficiente de comportamento
Alvenaria não reforçada	1,5 – 2,5
Alvenaria confinada ou cintada	2,0 - 3,0
Alvenaria reforçada	2,5 – 3,5

Face ao tipo de construção existente no quarteirão, e apesar de se terem observado alvenarias com boas características, o coeficiente de comportamento que pode ser adoptado é de 1,5. Deste modo as tensões obtidas e apresentadas nos capítulos seguintes podem ser minoradas por este valor uma vez que se usou como acção o acelerograma registado aquando a ocorrência do sismo de 1998 escalado para os valores regulamentares.

4.3. Análise sísmica das casas com base nos modelos calibrados

Neste trabalho apenas se apresentam os resultados em uma das casas (casa n° 15) uma vez que nas restantes as conclusões são qualitativamente semelhantes.

4.3.1. Casa n.º 15

Numa primeira análise calcularam-se as tensões resultantes das acções estáticas verticais (cargas permanentes + sobrecargas). Estes valores são importantes para comparar com os resultantes dos efeitos da acção do sismo acima, permitindo avaliar um factor de amplificação. Os valores e distribuições das tensões representadas referem-se a duas paredes da casa n° 15, nomeadamente a parede frontal e a parede meeira direita (Figura 8). Com estes dois elementos procurou-se identificar os pontos mais

Figura 8
Casa nº 15 – Paredes analisadas.

críticos e vulneráveis da estrutura, que evidenciam alguns dos problemas aí existentes.

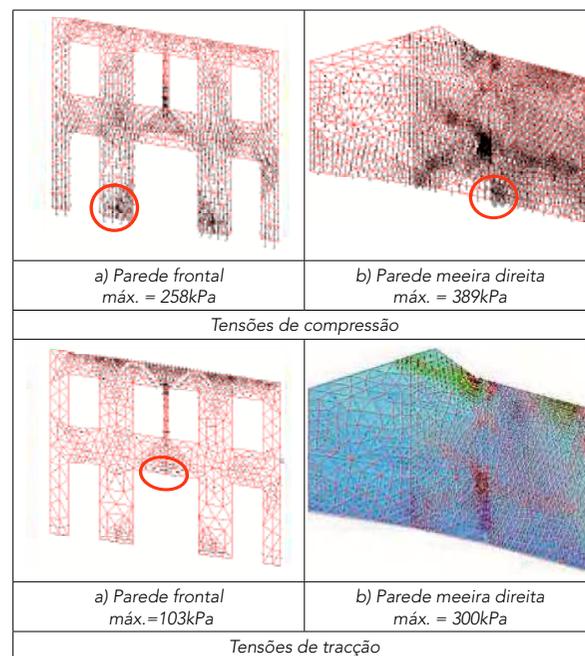
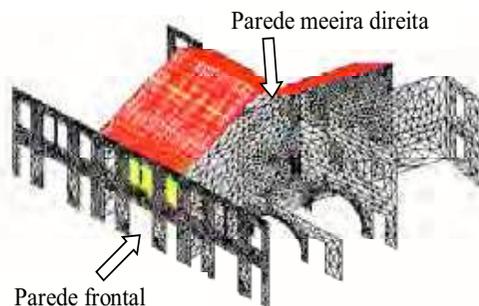


Figura 9
Casa nº 15 - Mapas de tensões principais e respectivas direcções para cargas estáticas.

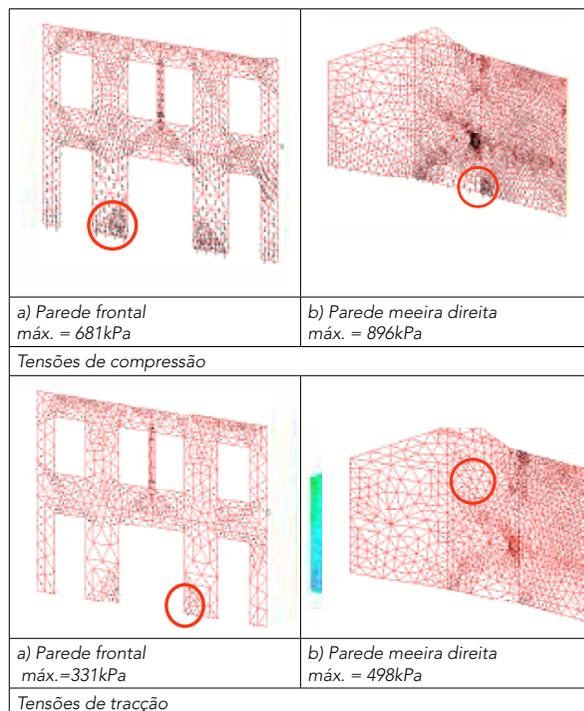
Os resultados das acções estáticas verticais (Figura 9) mostram valores das tensões principais instaladas nas duas paredes e respectivas direcções.

A avaliação das tensões principais e a sua direcção assumem especial interesse uma vez que permitem, por um lado quantificar as tensões máximas instaladas e, por outro, compreender o "caminho das forças" que permite identificar a direcção das fendas em cada local.

Tratando-se de elementos finitos de casca, as tensões nas paredes podem ser avaliadas no seu plano médio ou nos planos das faces. Como no presente trabalho se procura sempre referir às tensões máximas, então os valores e distribuições obtidos reportam-se sempre ao plano onde se obtenham os efeitos mais gravosos; a orientação das tensões será então a que corresponde a esse plano.

As cargas estáticas induzem na estrutura baixos valores de tensões que se afiguram compatíveis com a resistência dos materiais. As compressões têm valores da ordem de 300 kPa e estão localizados na base das paredes, resultantes essencialmente do peso destas uma vez que o peso dos pavimentos tem comparativamente pouco significado. Os esforços de tracção estão localizados no topo das paredes onde a carga vertical descendente é menor e nos vãos das aberturas, essencialmente na direcção horizontal devido à migração dos esforços para os painéis laterais das aberturas.

Apesar de não se dispor de resultados de resistência à compressão e à tracção das paredes, pela dificuldade de os realizar no âmbito deste trabalho, é patente que as tensões de compressão estão bastante abaixo dos valores mínimos de resistência. Já para as tensões de tracção, admitindo mesmo uma relação de cerca de 10% da resistência à tracção face à de compressão, observa-se que, admitindo uma resistência de cerca de 200 kPa, os resultados não são tão satisfatórios. No entanto, refira-se que as tracções localizadas nas padieiras das aberturas, são absorvidas, em geral, por elementos únicos de pedra



que vencem o vão da abertura, e que por não terem juntas, têm a resistência necessária para resistir aos valores das tracções indicados. Já relativamente às tracções existentes no topo da parede meeira, estas são devidas à ligação dos elementos de casca dos pavimentos, que ligados aos elementos de casca das paredes, introduzem nesta zona momentos flectores dos quais resultam as tracções indicadas. É um fenómeno local, que pode ser desprezado, uma vez que as paredes não conferem encastramento aos pavimentos que nelas apoiam.

Os resultados da acção sísmica estão representados na Figura 10 e correspondem à envolvente de tensões para todos os pontos e não a um nível de tensões correspondentes a um determinado instante.

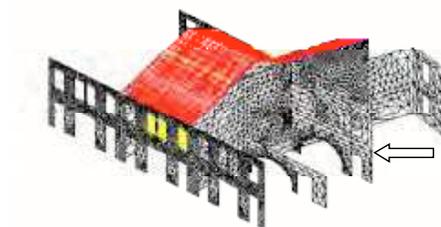
Os resultados mostram um aumento significativo do valor das compressões, com um factor de amplificação de cerca de 2,50. Relembre-se que os valores das tensões sísmicas podem ser reduzidos para ter em conta o comportamento não linear das estruturas, passando o factor de amplificação para a ordem de 1,70 admitindo um coeficiente de comportamento de 1,5.

Apesar do aumento sofrido, os valores das compressões não comprometem a segurança da estrutura, permanecendo abaixo da resistência estimada das paredes.

A acção sísmica induz um aumento significativo nas tracções, principalmente na parede frontal com um factor de amplificação de cerca de 3; no entanto, atendendo a que se trata de uma análise no domínio elástico e considerando um coeficiente de comportamento de 1,5, resulta um valor de 2 para o referido factor de amplificação. Estes esforços localizam-se essencialmente junto às aberturas das janelas ou portas, e junto às intersecções com outros elementos em zonas de descontinuidade estrutural. Na parede meeira direita, em particular, pode-se verificar a concentração de tensões de tracção nas zonas de intersecção com as paredes da habitação vizinha que, sendo muito rígidas no seu plano, originam uma concentração de esforços. A parede assinalada na Figura 11 funciona como apoio à parede meeira ao longo da sua altura obrigando aquela a flectir em torno de um eixo vertical desenvolvendo-se tracções horizontais significativas. Recorde-se que quando solicitadas por acções horizontais, estas paredes estão apoiadas nas paredes perpendiculares, na base e ao nível dos pisos, dependendo a eficácia destes últimos da sua rigidez no seu plano.

Figura 10
Casa nº 15 - Mapas de tensões principais e respectivas direcções para cargas sísmicas.

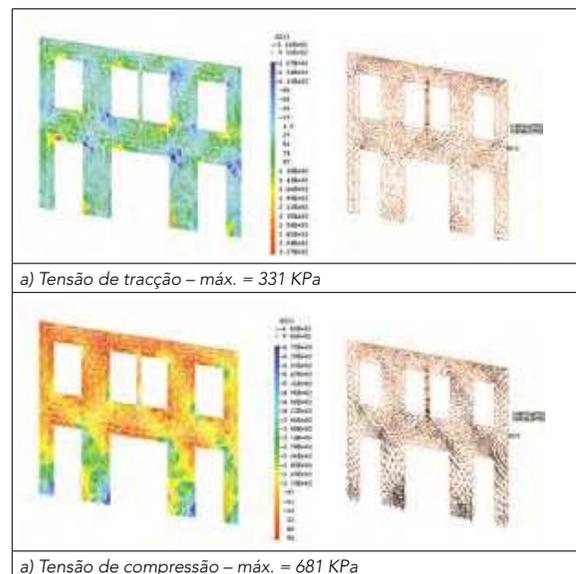
Figura 11
Casa nº 15 – Parede meeira direita / Parede da habitação vizinha.



Este tipo de estruturas quando sujeitas à acção do sismo tendem a funcionar como “caixas” em que cada parede é travada por uma perpendicular. Este “funcionamento” traduz-se no aparecimento de forças de tracção nas ligações entre paredes (zonas dos cunhais) principalmente nos pisos superiores, onde as forças de inércia são maiores, conduzindo muitas vezes a tensões superiores à reduzida resistência da própria parede. Um dos danos que se observa muitas vezes é o destacamento de cantos de casas e a fissuração nas zonas dos cunhais.

A análise dos valores máximos das tensões em todos os pontos assume particular interesse uma vez que permite localizar os pontos mais solicitados e eventualmente com maior necessidade de reforço. No entanto, é igualmente importante avaliar as tensões da estrutura num determinado instante para assim se compreender o seu comportamento. Na Figura 12 representam-se as tensões na parede frontal, para os instantes em que foram atingidos os valores máximos de tracção e compressão na parede. Na Figura são visíveis os caminhos das tensões de compressão e tracção nos painéis horizontais entre aberturas, caracterizando um funcionamento tipo flexão que é ainda mais evidenciado por uma distribuição de tensões na base das paredes característica de esforços de flexão.

Figura 12
Casa nº 15 – Parede frontal
- Tensões para o mesmo instante (compressão e tracção) Mapas de tensões e respectivas direcções.



4.3.2. Análise dos efeitos sísmicos nos pavimentos calibrados

O estudo do comportamento sísmico das casas nº 15, 16 e 24 incluiu também a análise e distribuição dos esforços gerados nos pavimentos. Neste trabalho apenas serão mencionados os valores dos esforços de membrana nos pavimentos, provocados pela interacção destes elementos com as paredes. Importa realçar que estes esforços podem servir de base para o dimensionamento de reforços dos elementos que constituem os pavimentos e as suas ligações aos elementos em que apoiam.

O Quadro III descreve os esforços que são gerados nos pavimentos dos pisos com rigidez no seu plano conforme resultado da calibração.

Quadro III – Esforços nos pavimentos associados à acção sísmica

Estrutura	Esforços máximos de membrana (kN/m)			
	Direcção longitudinal do quarteirão		Direcção transversal do quarteirão	
	Tracções	Compressões	Tracções	Compressões
Casa nº 15	25 kN/m	30 kN/m	47 kN/m	50 kN/m
Casa nº 16	23 kN/m	22 kN/m	11 kN/m	13 kN/m
Casa nº 24	30 kN/m	28 kN/m	15 kN/m	14 kN/m

Estes valores, apesar de não serem muito altos para pavimentos correntes onde são controladas as ligações e a constituição dos elementos, podem provocar danos significativos nas zonas de ligação às paredes, podendo mesmo originar deslocamentos relativos entre os dois elementos, nos casos de existência de tracções. É por isso importante avaliar esquemas de melhoramento e reforço que permitam de uma forma eficaz assegurar a transmissão destes esforços, cuja grandeza estará naturalmente associada ao comportamento dos pavimentos e à sua rigidez no seu próprio plano. Assim, em cada situação deve-se avaliar o estado dos soalhos e dos barrotes, proceder à sua caracterização, e reforço se necessário, e basear o estudo das ligações em modelos numéricos que traduzam a realidade do elemento estrutural.

4.4. Análise da influência das características dos pavimentos e do efeito de grupo no comportamento estrutural das casas.

4.4.1. Considerações gerais

Os pavimentos são elementos essenciais para o bom comportamento das estruturas que compõem o quarteirão. A partir dos ensaios dinâmicos realizados, e consequente calibração dos modelos numéricos, foi possível estimar o comportamento dos pavimentos com rigidez no seu plano, simulado por elementos de casca com espessura de 1.5 cm. Este valor é suficiente para conferir apoio às paredes ao nível dos

pisos, com comportamento de diafragma e rigidez no seu próprio plano, conforme se pôde concluir dos resultados dinâmicos das casas. No entanto, convém lembrar que os resultados experimentais foram baseados em ensaios em vibração livre com baixos valores de deslocamentos. Na realidade os deslocamentos num caso de sismo podem ser manifestamente superiores aos medidos, sendo relevante o comportamento não linear essencialmente ao nível da eficiência da ligação entre elementos. Deste modo, é importante analisar o comportamento das estruturas tendo em conta pavimentos de menor qualidade e com menor eficácia. Grande parte das casas deste quarteirão não sofreu até à data qualquer obra de melhoramento ou reforço global, não existindo assim reforços na constituição dos pavimentos nem na sua ligação às paredes. É previsível por isso que estes tenham uma menor rigidez no seu plano podendo em casos limites (mais improváveis devido à continuidade dos edifícios) não conferir qualquer travamento. Uma análise não linear das ligações dos pavimentos, apesar de útil, não caracterizaria todos os casos existentes mesmo em cada habitação. Assim, para além da modelação calibrada com o modelo experimental, consideraram-se ainda as seguintes hipóteses com base no comportamento linear elástico:

- Paredes calibradas com pavimentos sem funcionamento de diafragma – Esta modelação pretende traduzir eventuais fragilidades na ligação das tábuas do soalho que não comportem solicitações importantes como os sismos.
- Paredes calibradas sem pavimentos e sem carga aplicada. Uma das causas principais do colapso deste tipo de estruturas está associada à ligação dos pavimentos às paredes que quando é insuficiente, numa primeira fase provoca o colapso dos pavimentos (grandes deformações das paredes retiram o apoio aos pavimentos), deixando depois as paredes sem travamento ao longo da sua altura.

Figura 13
Casa n° 24 – Modelo sem efeito de “grupo”.

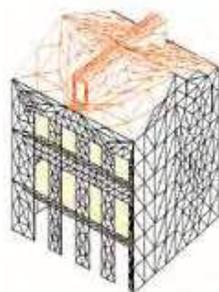
Para cada uma das hipóteses referidas e para cada uma das casas fizeram-se análises dinâmicas e sísmicas a partir das quais foi possível caracterizar a influência dos pavimentos no comportamento das estruturas.

Para além do estudo do comportamento dos pavimentos é importante avaliar a influência do efeito de grupo e do funcionamento conjunto das edificações pertencentes ao quarteirão. Apesar de não ter uma aplicação específica para o caso particular em estudo, esta análise é útil para demonstrar a necessidade de contar com o efeito conjunto para o estudo deste tipo de estruturas muito comuns em centros urbanos.

Assim, para cada uma das casas, efectuaram-se alguns estudos comparativos dos resultados, em termos de tensões e deslocamentos, dos modelos das casas com e sem efeito de grupo. Em cada um dos casos, foram considerados os três possíveis funcionamentos dos pavimentos referidos anteriormente. Neste trabalho apresentam-se alguns resultados obtidos para a casa n° 24.

4.4.2. Casa n° 24

Para além das análises do modelo com efeito de grupo (Figura 4), foi também adoptado um modelo fictício com a casa isolada (Figura 13) a partir do qual foram estudadas as três hipóteses de funcionamento dos pavimentos. Para ambos os casos procedeu-se às análises das variações dos valores máximos das tensões associadas às características dos pavimentos e da existência do efeito conjunto das casas vizinhas.



O estudo dinâmico considerando-se o comportamento isolado da casa com três hipóteses de funcionamento dos pavimentos, permitiu obter os dois primeiros modos de vibração conforme se representa na Figura 14 e na Figura 15.

Da análise dos resultados modais pode-se observar o aumento significativo das frequências próprias da estrutura com a colocação e com o aumento da rigidez dos pavimentos. Para além do aumento das frequências é visível a modificação das respectivas configurações modais. É interessante igualmente verificar que, comparando os resultados das Figuras 14 e 15, e ao contrário do que havia acontecido nas casas 15 e 16 (ver Neves, 2004), a consideração do efeito de grupo no caso dos pavimentos com rigidez no seu plano reflecte-se numa diminuição da frequência associado ao movimento perpendicular à Rua Serpa Pinto (de 5.48Hz para 4.54Hz). Se nos casos anteriores o quarteirão contribuiu para um aumento de rigidez do edifício, neste caso as casas vizinhas condicionam o comportamento do canto e conseqüentemente da casa n° 24, não sendo possível afirmar tão peremptoriamente qual o tipo de influência existente.

Se for feita a comparação (Figuras 16 e 17) entre os valores máximos das tensões das paredes para cada caso pode-se verificar que as diferenças dos valores das tensões são mais acentuadas na parede frontal, registando-se aí os maiores valores de tracção e compressão no caso de inexistência dos pavimentos.

Como justificação para este facto, relembra-se que a parede frontal é mobilizada perpendicularmente ao seu plano no 1° modo de vibração.

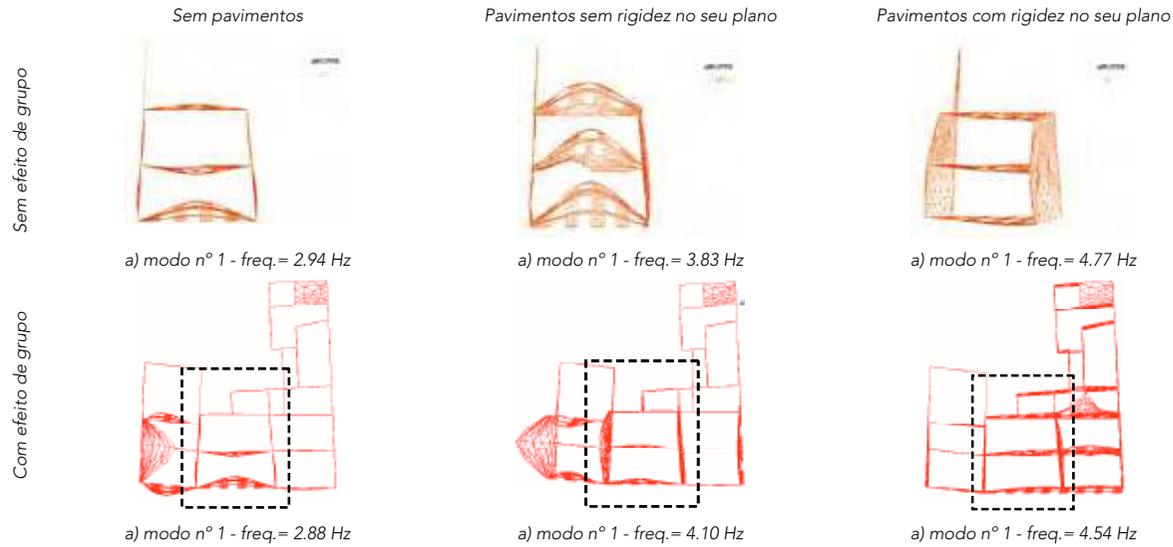


Figura 14
Casa n° 24 – Resultados modais – Influência dos pavimentos e do efeito de grupo nos resultados dinâmicos (1° modo de vibração).

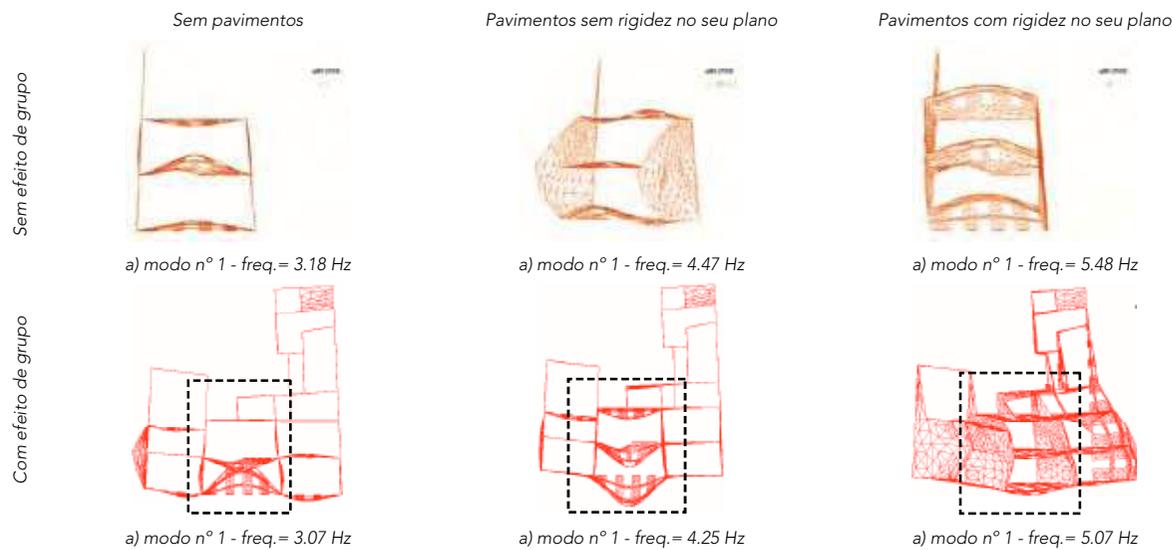


Figura 15
Casa n° 24 – Resultados modais – Influência dos pavimentos e do efeito de grupo nos resultados dinâmicos (2° modo de vibração).

Figura 16
Casa n° 24 – Comparação global de tensões de compressão.

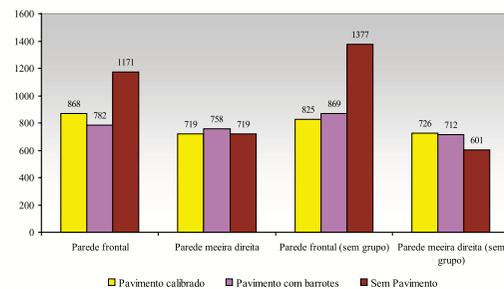
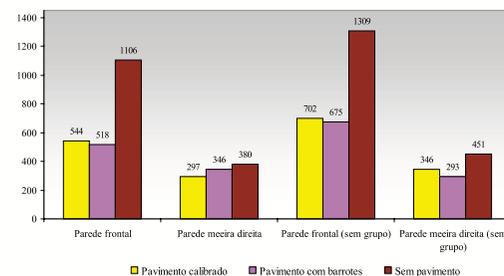


Figura 17
Casa n° 24 – Comparação global de tensões de tração.



Verifica-se que não existem variações significativas na parede lateral. Mesmo na parede frontal a variação é apenas digna de nota se o pavimento não for considerado. Os pavimentos sem rigidez no seu plano permitem homogeneizar o funcionamento de paredes opostas, em correspondência com o que se observa nos resultados dinâmicos na Figura 14. De um modo geral, nos resultados das tensões verifica-se que a ausência de pavimentos provoca um aumento nas tensões das paredes da casa. As diferenças associadas à rigidez dos pavimentos no seu plano não são tão notórias, apenas com ligeiras variações. Este facto é explicado pelo maior número de paredes mestras que, estando mais próximas, contribuem para a diminuição da influência da rigidez dos pavimentos.

O efeito de grupo provoca ligeiras diferenças nos valores das tensões e evidenciam um ligeiro aumento no caso da inexistência das edificações vizinhas. No entanto, é importante salientar que a consideração do efeito de grupo, apesar de não provocar diferenças significativas dos valores das tensões, pode alterar a localização dos valores máximos das mesmas. Esta análise assume particular importância se se pretender proceder à reabilitação ou reforço da estrutura.

Finalmente nas Figuras 18 e 19 estão representados os resultados dos deslocamentos perpendiculares às paredes.

Da análise dos resultados dos deslocamentos das duas paredes verifica-se que a parede frontal é a mais flexível podendo atingir deslocamentos de 1.5 cm. Deve-se, no entanto, atender ao facto de que, na parede meeira, os deslocamentos foram calculados em pontos próximos de paredes perpendiculares, i.e., em zonas mais rígidas, tendo-se assim obtido valores mais reduzidos de deslocamentos e menores influências dos pavimentos.

Na parede frontal, o deslocamento relativo entre pisos é, como seria de esperar, maior no caso da inexistência de pavimentos podendo atingir o valor de 0.2%. Já a parede meeira, apresenta um comportamento um pouco diferente, devido à existência das paredes perpendiculares, que, apesar de conferirem maior rigidez, não se prolongam até à cobertura provocando variações bruscas nos deslocamentos próximos da cobertura. Este facto foi igualmente descrito nas análises de tensões. Apesar do efeito favorável das paredes perpendiculares, a sua interrupção ao longo da altura cria pontos de descontinuidade estrutural muito nefastos para este tipo de estrutura, propícios à existência de concentrações de tensões que devem ser evitados. É interessante verificar que, apesar das reduzidas diferenças no valor máximo das tensões, a análise da sua distribuição e das deformações evidenciam comportamentos muito distintos, o que está de acordo com o facto de, para cada uma das hipóteses de comportamento

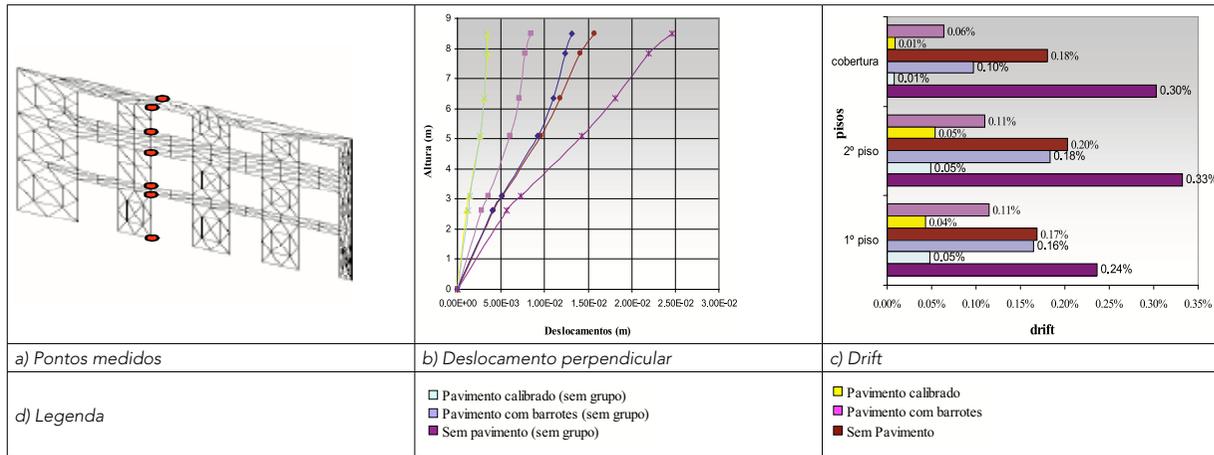


Figura 18
Casa nº 24 - Parede Frontal – Deslocamentos e “drift” – Modelos com e sem efeito de grupo.

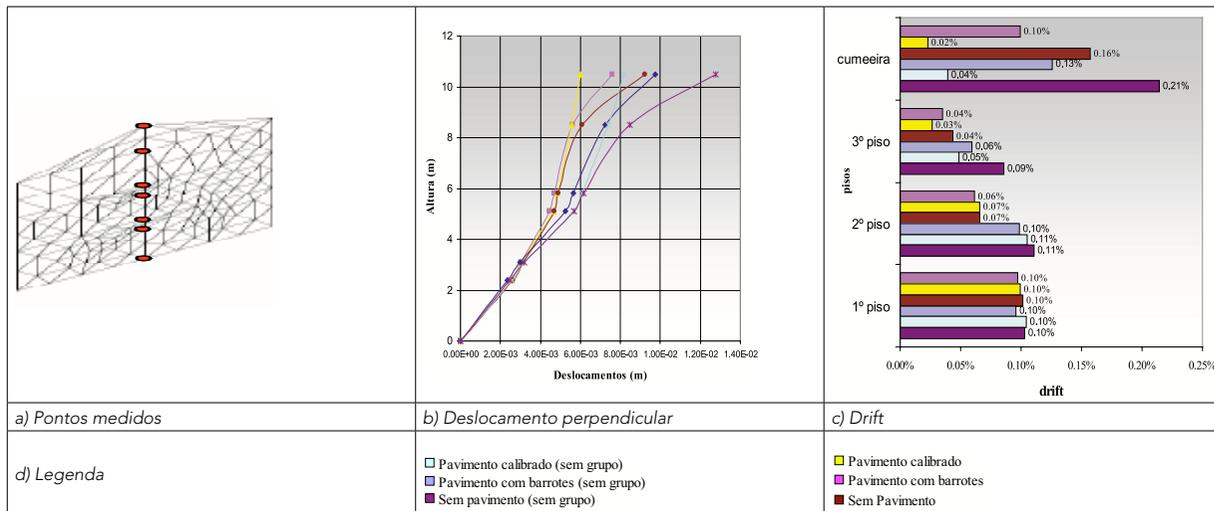


Figura 19
Casa nº 24 - Parede meeira direita – Deslocamentos e “drift”.

dos pavimentos, a estrutura apresenta características dinâmicas distintas que se reflecte nos efeitos da acção considerada.

Os deslocamentos calculados sem efeito de grupo apresentam uma distribuição em altura semelhante aos observados com as estruturas vizinhas mas com valores superiores. Saliente-se que a influência do efeito de grupo é crescente com a diminuição da rigidez dos soalhos. Analisando a influência do efeito de grupo nos valores "drift" é visível que enquanto nos modelos com os pavimentos calibrados as diferenças são pouco significativas, nos sem pavimentos verificam-se aumentos consideráveis nas deformações. Se se considerar a estrutura com pavimentos calibrados constata-se igualmente que a influência do grupo nos deslocamentos da parede frontal é praticamente nula.

Apesar de estar perto de um canto, a parede frontal é mobilizada na direcção perpendicular ao desenvolvimento longitudinal do quarteirão, para a qual os elementos rígidos são as paredes mearas. Existindo pavimentos rígidos capazes de lhes transmitir as cargas e evitar a flexão horizontal da parede, consegue-se maior eficácia no comportamento global e menor influência dos elementos de grupo, que são mais condicionantes na direcção longitudinal.

Relativamente à parede meeira direita as diferenças são pouco significativas devido à existência de uma parede mestra interior à estrutura que condiciona o comportamento naquele alinhamento.

4.5. Análise global do quarteirão

4.5.1. Introdução

Nos parágrafos anteriores foram descritos sumariamente os processos que conduziram à calibração dos modelos numéricos parciais do quarteirão e descritas sumariamente as conclusões das análises sísmicas e dinâmicas efectuadas. Para além do importante processo de calibração dos modelos numéricos aí referidos foi possível analisar a resposta dos edifícios

à acção dos sismos, considerando a sua localização dentro de um quarteirão (D'Ayala *et al.*, 1999 e Penazzi *et al.*, 1999) por forma a atender ao designado efeito de grupo. A análise local das estruturas que compõem o quarteirão contribuiu para identificar os pontos mais frágeis em cada uma delas e avaliar a influência do efeito de grupo nas respostas dos edifícios. Foi também possível avaliar a influência das características dos pavimentos no comportamento estrutural.

O estudo global do quarteirão foi feito através de modelos numéricos com base nas características calibradas nos modelos parciais e com variantes que permitiram estudar a influência das características dos pavimentos e das paredes que constituem as casas. Simularam-se reforços localizados para se analisar a influência destes no comportamento global do quarteirão. Por outro lado, e uma vez que parte do quarteirão é constituída por um edifício recente em betão armado, avaliou-se também a influência deste "elemento mais rígido" no comportamento global do quarteirão face à acção do sismo. De facto, o edifício dos correios encontra-se num topo do quarteirão, colocando o centro de rigidez numa posição consideravelmente afastada do centro de massa e gerando assim excentricidades que podem agravar os efeitos do sismo nas construções de alvenaria através de movimentos de torção.

4.5.2. Análises numéricas globais do quarteirão

No processo de calibração foram aferidas as propriedades das paredes (Quadro IV) e dos soalhos que melhor representavam a resposta obtida nos ensaios dinâmicos efectuados.

Quadro IV – Casas nos 15, 16 e 24. Propriedades da alvenaria de pedra

Paredes	Material	ρ (ton/m ³)	E (GPa)
Casa n° 15	Alvenaria de pedra	1.8	0.65
Casa n° 16	Alvenaria de Pedra	1.8	0.8
Casa n° 24	Alvenaria de Pedra	1.8	0.8

Tal como havia sucedido com os modelos parciais, no modelo calibrado os pavimentos foram modelados com elementos de casca de 1.5cm de espessura, conferindo-lhes uma razoável rigidez no seu plano, com densidade equivalente ao peso dos pavimentos com madeira de criptoméria. Esta estratégia foi igualmente adoptada nos modelos numéricos globais do quarteirão. De facto, para além da definição geométrica realizada antes e no decorrer do desenvolvimento do trabalho, foi necessário caracterizar mecanicamente os materiais que compõem cada um dos edifícios do quarteirão, para o que foram utilizadas as características mecânicas dos materiais calibradas.

4.5.2.1. Modelo global do quarteirão calibrado

Com base em levantamentos efectuados “in situ”, quer durante a execução dos trabalhos dinâmicos, quer previamente (logo após o sismo de 1998), foi possível caracterizar geometricamente o quarteirão e, conseqüentemente, elaborar modelos numéricos adequados para representarem a estrutura real, figura 20.

Foram extrapoladas as características então adoptadas (Quadro IV). Para as restantes foi necessário extrapolar as características das casas nos 15, 16 e 24, tendo por base a visualização das fachadas principais e alguns levantamentos efectuados numa fase anterior a este trabalho. Relativamente ao edifício dos correios foram utilizadas as propriedades do betão B25 ($\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$ e $E = 29 \text{ GPa}$) com as paredes modeladas com elementos de casca de 15cm de espessura para atender à existência de aberturas e as lajes com 15cm de acordo com observação “in situ”.

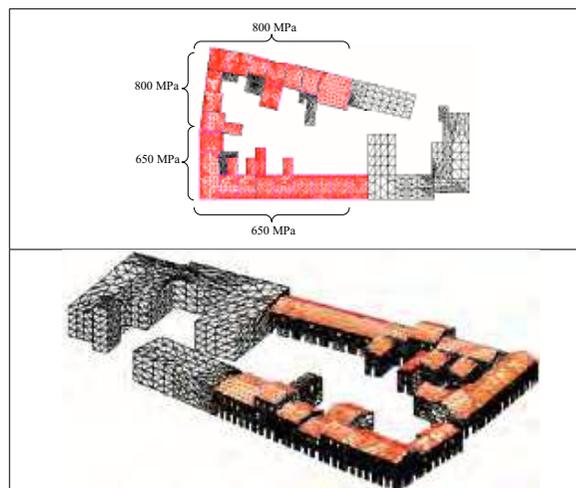
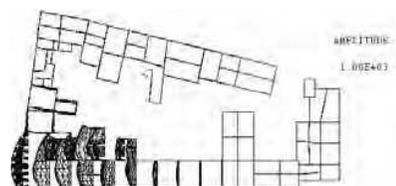


Figura 20

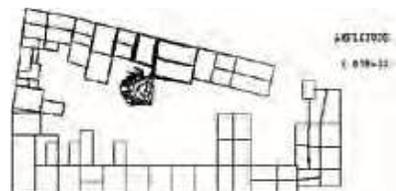
Quarteirão - Modelo global - Módulo de deformabilidade adoptado para as paredes dos edifícios de alvenaria.

A discretização dos elementos estruturais do edifício dos correios foi feita de uma forma simplificada, tendo-se procurado apenas garantir uma rigidez da mesma ordem de grandeza da estimada através dos resultados experimentais dinâmicos. A análise dinâmica permitiu obter as frequências e os modos de vibração representados na Figura 21 onde se incluem também as referências aos modos locais das casas que têm correspondência com os modos globais do quarteirão. Chama-se particular atenção ao modo n° 3, que apesar de mobilizar de uma forma mais notória uma das casas da Travessa da Misericórdia, envolve também as casas do canto entre a mesma Travessa e a Rua Serpa Pinto, activando assim a casa n° 24.

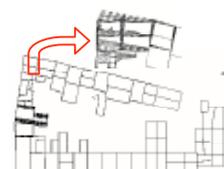
Figura 21
Quarteirão – Modos e frequências de vibração para o modelo global com pavimentos com efeito de diafragma.



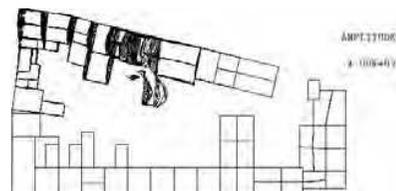
1º modo- $f = 4.52$ Hz (1º modo casa nº 15)



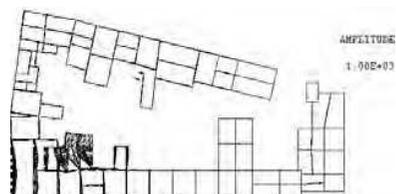
2º modo- $f = 4.63$ Hz (1º modo casa nº 16)



3º modo- $f = 4.75$ Hz (1º modo casa nº 24)



4º modo- $f = 5.09$ Hz (2º modo casa nº 24)



5º modo- $f = 5.53$ Hz (2º modo casa nº 15)

Por análise dos resultados representados na Figura 21 pode-se observar que as zonas mais vulneráveis à acção dos sismos são os cantos (modos n.º 1, 4 e 5), assim como os locais com heterogeneidades em planta (modo n.º 2) e os locais com heterogeneidades em altura (modo n.º 4).

Para além da localização destes pontos, importa comparar estes resultados com os obtidos nos estudos locais das casas 15, 16 e 24 apresentados na análise específica e individual de cada casa. Assim, na Figuras 22 e 23 apresentam-se as frequências e configurações dos dois primeiros modos de vibração das casas no estudo individual e na Figura 24 compara-se os valores das frequências desses modos de cada uma das casas com os que lhe correspondem no modelo global.

É possível verificar a semelhança entre os valores das frequências em cada casa obtidos nos modelos numéricos individuais e os obtidos no modelo global do quarteirão. A maior diferença, de cerca de 10%, verifica-se na casa n.º 15 e pode ser explicada pela maior simplificação do efeito de grupo no cálculo individual e à maior influência dos edifícios vizinhos que estão mais afastados da casa. Repare-se que este modo mobiliza várias casas da Rua Comendador Ernesto Rebelo, existindo por isso um comportamento conjunto mais visível e preponderante.

Efectuou-se a análise sísmica do modelo global, considerando como acção o mesmo acelerograma adoptado nas análises sísmicas apresentadas nos estudos parciais, tendo-se igualmente escalado o acelerograma observado, de forma a obter o valor máximo de acelerações equivalente ao regulamentar. A partir desta análise localizaram-se os pontos mais solicitados e com maiores deslocamentos no conjunto das construções de alvenaria do quarteirão.

No âmbito da análise sísmica foram quantificadas as distribuições de tensões na fachada principal das casas de alvenaria de pedra (Figura 25).

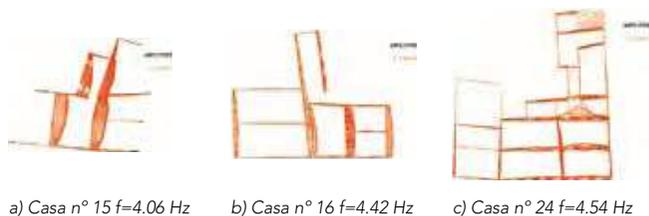


Figura 22
Casas nos 15, 16 e 24 – Análises individuais 1º modo.

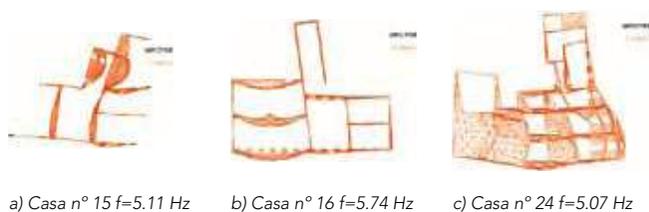


Figura 23
Casas nos 15, 16 e 24 – Análises individuais 2º modo.

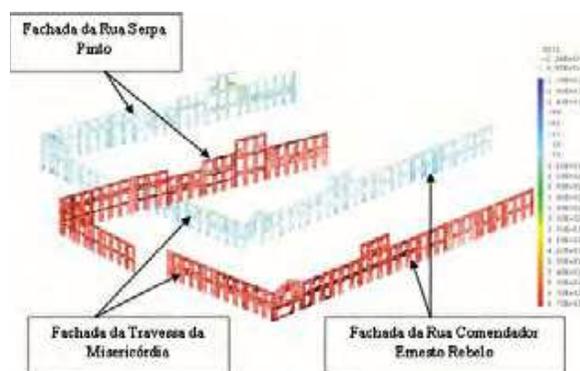


Figura 25
Distribuição e direcção das tensões principais de tracção (máximo 678 kPa) - Vista do modelo global.

Optou-se por analisar as tensões principais máximas e mínimas das paredes das fachadas principais das casas de alvenaria de pedra, das quais se apresentam o valor e respectiva direcção associada (Figura

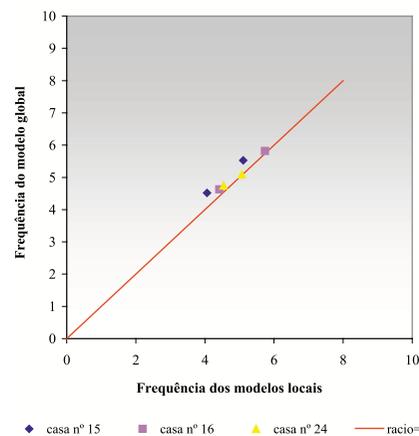


Figura 24
Casas nos 15, 16 e 24. Comparação dos modos (modelo individual/global).

26) respectivamente, para as tensões de tracção e compressão).

Os valores máximos das tensões de compressão e tracção são, respectivamente, de 1010 kPa e 678 kPa localizados essencialmente junto ao canto entre a Rua Serpa Pinto e a Travessa da Misericórdia e no canto oposto entre as Travessa da Misericórdia e a Rua Comendador Ernesto Rebelo. Existem igualmente tracções elevadas na casa n.º 16, na ligação às casas vizinhas mais baixas e junto às aberturas. O valor de compressão está enquadrado nos limites de resistência das alvenarias enquanto que as tracções podem originar algumas fendilhações que, no entanto, não comprometem a estabilidade estrutural.

De um modo geral, verifica-se mais uma vez que os cantos e as discontinuidades nas cêrceas dos edifícios (casa n.º 16) são os locais mais vulneráveis neste tipo de aglomerado de casas. Para além dos locais referidos, onde é visível alguma concentração de tensões, verifica-se que o quarteirão tem uma boa

Figura 26
Distribuição e direcção das tensões principais de tracção e compressão - (Canto entre a Rua Comendador Ernesto Rebelo e a Travessa da Misericórdia).

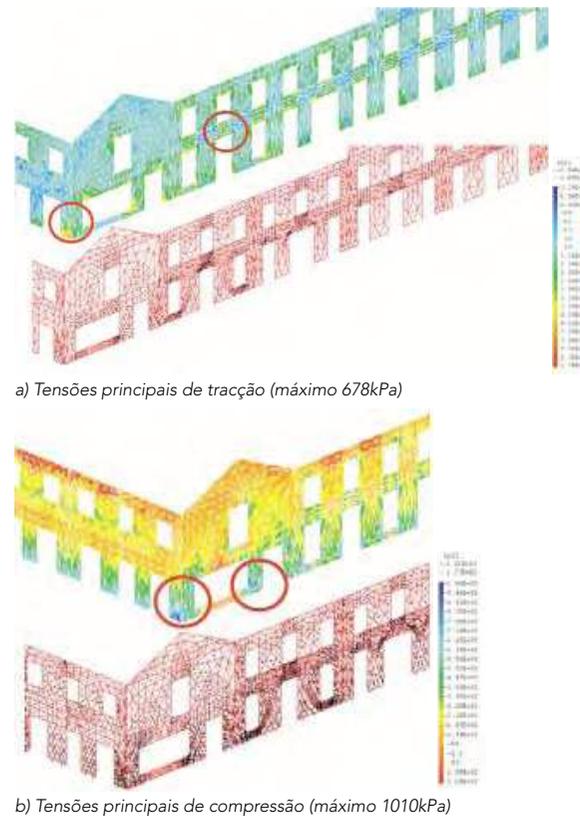
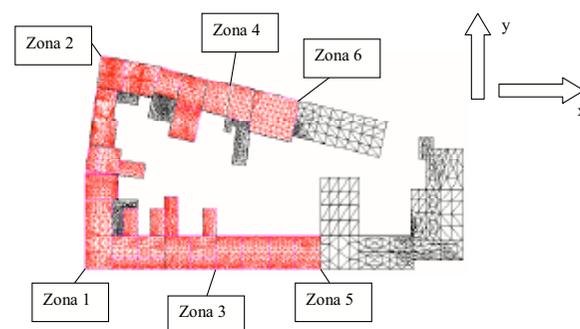


Figura 27
Alinhamentos com deslocamentos medidos.



distribuição de tensões fruto da razoável homogeneidade das casas que o compõem.

A reduzida capacidade de deformação das paredes de alvenaria de pedra é um dos factores que condiciona este tipo de estruturas quando sujeitas a acções sísmicas. Por essa razão calcularam-se os deslocamentos máximos em seis zonas das paredes das fachadas principais dos edifícios do quarteirão (Figura 27). Em cada um dos casos avaliaram-se os deslocamentos nas direcções longitudinal (x) e transversal (y), apresentando-se na Figura 28 a variação em altura dos deslocamentos na zona 1 onde se representam os valores dos deslocamentos absolutos, do "drift" (deslocamento relativo entre pisos) e os pontos dos quais se calcularam os deslocamentos.

Neste trabalho apresentam-se apenas os resultados da zona 1 onde se verificam maiores deformações na direcção longitudinal do quarteirão em correspondência com as configurações modais obtidas. A estes deslocamentos estão associados valores do "drift" de 0.04% a 0.12%, que não devem comprometer a estabilidade estrutural. Os deslocamentos são medidos em zonas de intersecção de alinhamentos de paredes, pelo que, as deformações obtidas resultam de deformações no plano das paredes estruturais. Assim, apesar dos valores analisados neste alinhamento serem relativamente baixos, podem estar associados a outros, localizados a meio de paredes sem travamento numa das direcções, cuja deformação dependa da rigidez das mesmas "fora do plano" e que, conforme observado na análise individual das casas podem ser bastante mais elevados.

Estes alinhamentos foram escolhidos de forma a evitar efeitos locais nos resultados, deturpando assim o objectivo desta parte da análise do estudo que visa a análise do comportamento global do quarteirão.

4.5.2.2. Estudo da influência dos pavimentos

As características dos pavimentos adoptadas no modelo calibrado são válidas nas condições dos ensaios dinâmicos efectuados e para os quais a

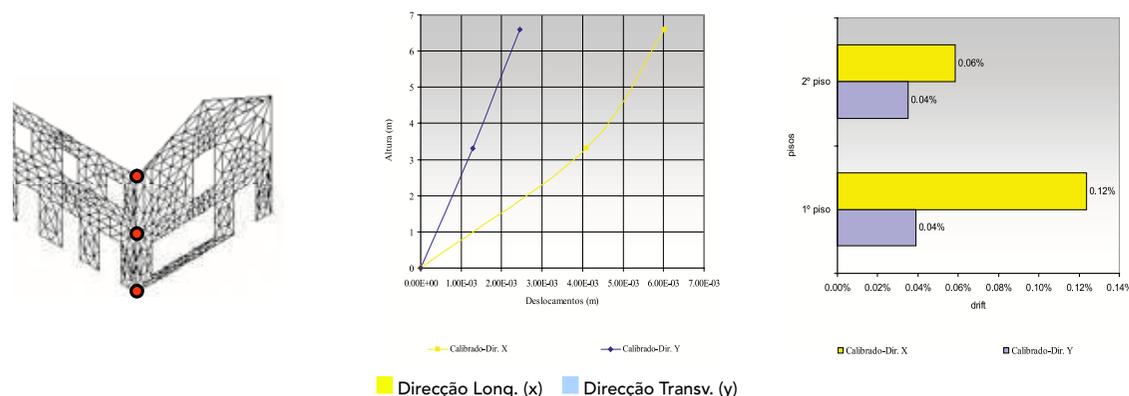


Figura 28
Zona 1 – Deslocamentos.

solicitação era de reduzida intensidade. No caso da ocorrência de sismos, as acelerações são bem maiores e as características tidas como “calibradas” só são válidas se existirem eficazes ligações entre elementos e com mecanismos que lhes garantam maior eficiência. Para avaliar a influência das características dos pavimentos e de eventuais reforços localizados foram considerados os modelos descritos a seguir:

Modelo global do quarteirão com os pavimentos compostos só por barrotes, portanto sem rigidez apreciável no próprio plano, materializados com elementos de casca com 0.15 cm de espessura, tal como se procedeu nas análises individuais das casas.

Modelo global do quarteirão com os pavimentos compostos só por barrotes, mas reforçados em algumas casas, tendo nestes casos rigidez no seu próprio plano.

Neste último caso o reforço seria aplicado considerando que a maioria das estruturas tinham os pavimentos com fraca qualidade e que se procederia a obras de melhoramento e reabilitação dos pisos e telhados das estruturas representadas na Figura 29. Estas estruturas foram escolhidas com base em critérios de localização (cantos), de heterogeneidades em altura (casa nº 16) e de uma casa a meio de um alinhamento contínuo e homogêneo.

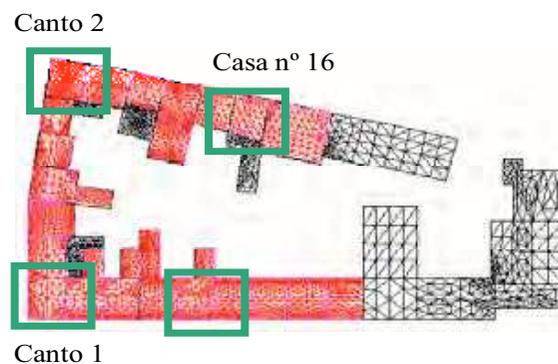


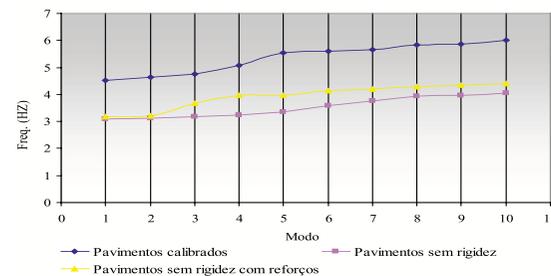
Figura 29
Quarteirão – Localização das casas com reforços.

Em cada uma delas os pavimentos foram modelados com elementos de casca com 1.5 cm de espessura (valor calibrado) enquanto que para as restantes os pavimentos foram modelados sem rigidez no plano. Nas paredes foram consideradas as características calibradas

Confrontando os resultados para as hipóteses referidas paralelamente com os gráficos da Figura 30 pode-se verificar que a eficácia da solução de reforço considerada não se manifesta nos dois primeiros modos de vibração, uma vez que estes mobilizam as estruturas mais flexíveis, não reforçadas. Nos modos

seguintes, pelo contrário, verifica-se um ligeiro aumento em quase todos os modos de vibração a que corresponde um aumento de rigidez “global do quarteirão” e não apenas das casas reforçadas. Nestas, para além do aumento da frequência, é notória a alteração das configurações modais particularmente o tipo de deformação das paredes.

Figura 30
Quarteirão – Influência do comportamento dos pavimentos nas frequências do quarteirão.



a) Frequências da estrutura

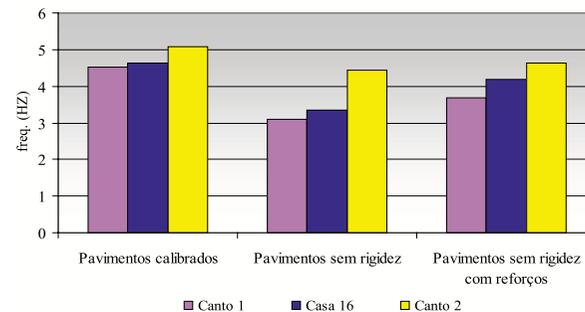


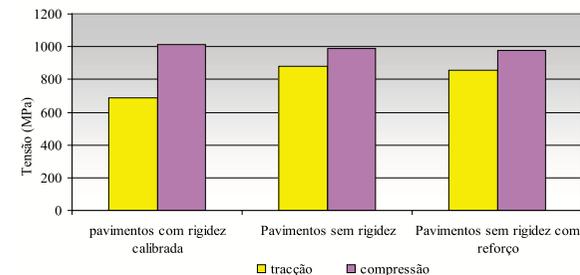
Figura 31
Quarteirão – Tensões máximas.

b) Frequências dos primeiros modos que mobilizam algumas zonas do quarteirão

O canto 1 e a casa n° 16 são mais vulneráveis à variação de rigidez dos pisos e conseqüentemente ao seu reforço. Pelo contrário, o canto 2, mais rígido, tem o seu funcionamento mais dependente das características das paredes. Veja-se que, ao contrário dos restantes, o modo do canto n° 2 mobiliza muitas casas, mesmo com os pavimentos sem rigidez. Neste caso, a orientação e disposição das paredes são fundamentais e o reforço considerado mostra-se pouco eficaz, melhorando apenas localmente o comportamento dos pavimentos. Para aumentar a sua eficácia

o reforço deve ser prolongado nas casas vizinhas. No canto 1 a rigidez do piso é importante na medida em que melhora o comportamento da fachada da Travessa da Misericórdia. A casa n° 16, sendo mais flexível devido à sua constituição e dimensão (3pisos), é também mais afectada pelo reforço.

Analisando agora a influência das características dos pavimentos nas tensões máximas das fachadas principais conclui-se que os valores máximos de compressões, normalmente localizados nas bases dos edifícios e com grande preponderância do peso da estrutura, não sofrem em geral grandes alterações, embora existam em alguns locais variações significativas que não comprometem a segurança estrutural. Pelo contrário o valor das tracções sofre acréscimos mais significativos quando não se considera rigidez no seu plano, devendo ser analisadas caso a caso, já que pode haver necessidade de conferir maior rigidez aos pisos ou aumentar a resistência e a coesão das paredes para garantir a segurança estrutural. O reforço considerado para os pavimentos de algumas casas tem pouca influência no valor máximo das tensões no quarteirão, apresentando localmente bons resultados e contribuindo para diminuições significativas de tensões nos locais reforçados (Figura 31).



Calcularam-se igualmente os deslocamentos do quarteirão em vários alinhamentos localizados nas várias zonas “críticas” e alvos dos reforços, quer na hipótese dos pavimentos sem rigidez, quer na hipótese do seu reforço, conforme descrito ante-

riormente. Apresentam-se apenas os resultados da zona 1 (Figura 32) onde se verifica que o maior deslocamento existe na direcção longitudinal do quarteirão, em correspondência com os resultados dinâmicos observados de cada um dos modelos (1º modo da zona 1 mobiliza-a na direcção longitudinal). É igualmente interessante verificar que o deslocamento é maior com os pavimentos com rigidez do que o contrário. De facto a rigidez dos pavimentos aumenta o efeito de comportamento "global" do canto, existindo nesse caso uma maior interacção das estruturas que se traduz num aumento de tensões e de deslocamentos.

Sumariamente, verifica-se que, em geral, a influência dos pavimentos aumenta com a altura do edifício, devido à menor rigidez relativa das paredes nos pisos superiores. Nos casos analisados não se observam grandes deformações, atingindo-se deslocamentos relativos entre pisos de cerca de 0.12%, não devendo provocar qualquer problema nos elementos estruturais. Relembre-se, no entanto, que estes deslocamentos foram medidos em alinhamentos de cruzamento de paredes com grande rigidez em qualquer uma das direcções. A meio das paredes os valores são significativamente maiores, devido ao funcionamento local das paredes.

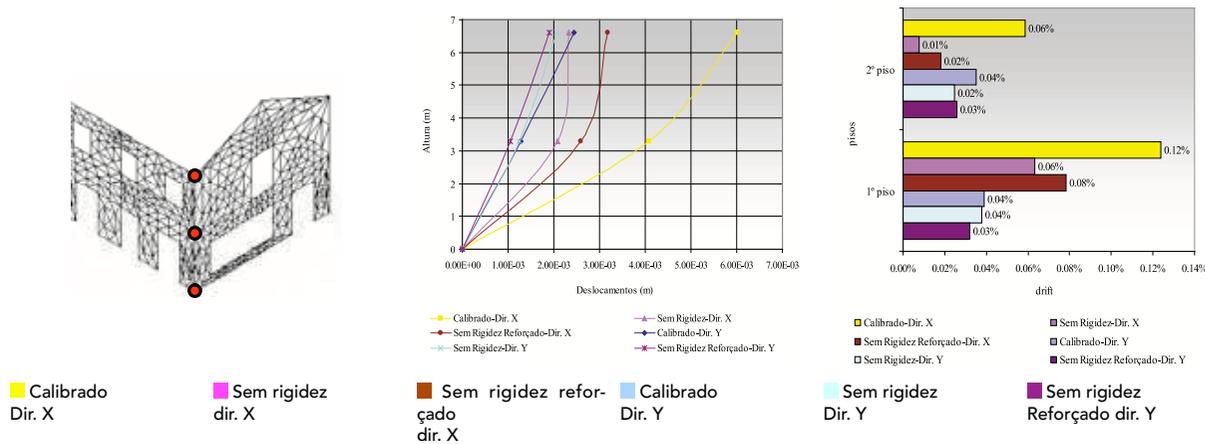


Figura 32
Zona 1 – Deslocamentos.

5. Conclusões

Neste trabalho foram apresentados alguns resultados de um vasto trabalho de análise do comportamento sísmico de um quarteirão específico da Cidade da Horta.

Os elementos estruturais que constituem o quarteirão apresentam características mecânicas com heterogeneidades significativas, quer devido à sua própria constituição (ao nível local) quer devido à dimensão da "estrutura global" em estudo, por abranger várias construções que, embora do mesmo tipo, podem ter qualidades diferentes. Estas heterogeneidades só podem ser quantificáveis de modo realista através de ensaios, razão pela qual o presente trabalho se apoiou num campanha experimental de medições de vibração ambiental.

Foram efectuadas algumas análises numéricas preliminares, por forma a planear convenientemente a prospecção "in situ", essencialmente ao nível dos pontos principais a serem medidos. Com base nos resultados preliminares e atendendo às limitações verificadas durante a execução dos trabalhos realizaram-se ensaios dinâmicos em três casas de alvenaria e no edifício de betão armado.

Apesar de algumas limitações ao nível da sensibilidade quando aplicadas em estruturas muito rígidas, as medições efectuadas forneceram resultados satisfatórios para a calibração dos modelos numéricos que permitiram estimar valores realistas das características mecânicas dos materiais e aferir estratégias adequadas de modelação de alguns dos seus elementos (tais como os pavimentos de soalho, por exemplo). Estes resultados assumiram grande importância na parte numérica do trabalho, uma vez que foram usados de forma sistemática na modelação de todos os edifícios do quarteirão para se obter uma avaliação fidedigna da sua resposta sísmica.

Para tal desenvolveram-se modelos numéricos para as casas analisadas que foram convenientemente calibrados. Para duas delas (casa nº 15 e casa nº 16) foi possível calibrar de uma forma satisfatória os dois pri-

meiros modos de vibração, enquanto que na terceira (casa nº 24) os resultados não foram tão satisfatórios, tendo-se apenas calibrado o primeiro modo de vibração. Os resultados do edifício de betão permitiram apenas avaliar a frequência do modo fundamental, não tendo sido possível definir a configuração modal associada.

Com base nos modelos calibrados procedeu-se à análise do comportamento sísmico de cada uma das casas. Neste processo, para além do modelo base calibrado efectuaram-se estudos em outros modelos que, embora baseados no primeiro, permitiram avaliar a influência de dois factores fundamentais: o efeito de grupo e o efeito dos pavimentos.

A utilização de modelos numéricos nesta fase revelou-se de grande importância uma vez que permitiu estudar cuidadosamente alguns parâmetros e melhor compreender os factores condicionantes ou mais relevantes para o comportamento das estruturas. O modelo calibrado teve como base a consideração do efeito conjunto e os pavimentos com boa rigidez no seu plano.

Esta última premissa, apesar de resultar dos ensaios dinâmicos efectuados, pode variar com a intensidade da acção a que os pavimentos estão sujeitos. O estado de conservação de algumas das casas, essencialmente dos pavimentos, e a deficiente ligação destes às paredes permite prever uma degradação das suas propriedades mecânicas com o aumento da acção. Foi por isso essencial prever duas hipóteses adicionais, uma sem pavimentos e outra com pavimentos sem rigidez. Em todas as casas os resultados traduziram a necessidade do pavimento ser convenientemente ligado às paredes e ter igualmente alguma rigidez no seu plano. Só assim se obtêm valores aceitáveis quer ao nível de tensões quer ao nível dos deslocamentos das paredes.

Relativamente ao estudo do efeito de grupo, verificou-se que a consideração isolada de cada uma das casas revela-se errada, não devendo ser usada mesmo com o pressuposto de ser um estudo do lado

da segurança. Na casa nº 24, por exemplo, situada próxima de um canto, o comportamento da parte é condicionado pelo todo existindo mesmo uma diminuição de rigidez associada ao comportamento conjunto. Para além das propriedades mecânicas, o efeito de grupo altera a distribuição dos esforços nas paredes podendo globalmente originar um valor máximo menor, mas localmente aumentar o esforço e/ou a deformação.

De um modo geral, os resultados dos modelos calibrados em termos das tensões e dos deslocamentos mostram um razoável comportamento das casas sob a acção de um sismo regulamentar ("escalado" do registado durante a ocorrência do sismo de 1998 na ilha do Faial). Deve-se no entanto ter em atenção, que estes resultados apenas são válidos se forem garantidas as características mecânicas (pavimentos, paredes e ligações) que resultaram da calibração baseada em ensaios de vibração ambiental, com uma acção de baixa intensidade, bem diferente da existente durante a ocorrência de um sismo.

Apesar das análises das estruturas com as características dos materiais calibradas se mostrarem favoráveis, assim como o enquadramento e verificações regulamentares, existe a necessidade de avaliar a qualidade dos pavimentos, e se necessário proceder ao seu reforço. O reforço com lajes maciças ou com vigotas pré-esforçadas de betão é viável mas não é estritamente necessário, uma vez que os materiais tradicionais (madeira de criptomeria, por exemplo) se forem bem aplicados e executados podem aliar a sua resistência (menor) ao seu baixo peso podendo diminuir a acção sísmica ao nível dos pisos. O estado de manutenção do soalho, as suas ligações às vigas e às paredes em que apoiam, são assim factores relevantes e condicionantes para o comportamento dinâmico deste tipo de estruturas uma vez que podem desempenhar um papel muito importante de travamento das paredes resistentes.

Relativamente às paredes é igualmente necessário verificar, e eventualmente reforçar, a sua qualidade

evitando heterogeneidades como as que se encontraram na casa nº 15. Refira-se a concentração de tensões existente nos cantos, nos cunhais das casas, principalmente quando os pisos não têm rigidez no seu plano. A ausência de ligação entre paredes opostas, e entre as paredes e as estruturas dos pisos, pode provocar grandes deformações nas paredes conduzindo ao colapso dos cantos ou das fachadas. Foi igualmente visível a existência de elevadas tensões nos painéis entre aberturas que podem provocar mecanismos de corte no plano das paredes e originar-lhe fendas diagonais, resultando essencialmente do mau posicionamento das aberturas e de diferenças de rigidez da parede entre aberturas.

Numa segunda fase foi feita a análise global do quarteirão recorrendo a um modelo global calibrado de acordo os resultados das casas nºs 15, 16 e 24. A impossibilidade da realização de ensaios dinâmicos e posteriores calibrações dos modelos numéricos de todas as casas do quarteirão obrigou à extrapolação dos resultados obtidos das casas referidas para as restantes com base em critérios de aparência das fachadas principais das casas. O modelo global principal foi assim obtido com as características das lajes baseadas nos pavimentos calibrados das casas e com rigidez no seu plano. Os resultados dinâmicos modais e sísmicos (tensões e deslocamentos) deste modelo permitiram avaliar os pontos mais desfavoráveis e vulneráveis à acção do sismo, tendo em conta o comportamento global do quarteirão.

No seguimento dos estudos numéricos efectuados em algumas das casas, avaliou-se a influência das características dos pavimentos no comportamento global do quarteirão. Assim, considerou-se uma hipótese com os pavimentos sem rigidez no seu plano e avaliaram-se as diferenças associadas. A inexistência de rigidez dos pavimentos diminui em alguns locais o "efeito" global do quarteirão, uma vez que a "continuidade" das estruturas é nesse caso garantida apenas pelas paredes resistentes. Os edifícios sem paredes-mestras interiores sofrem agravamento

de esforços nas suas paredes, enquanto que pelo contrário os que têm este tipo de paredes no interior com uma boa distribuição são menos dependentes da constituição dos pavimentos.

Uma das análises efectuadas foi a da influência de reforços localizados no comportamento global do quarteirão. Escolheram-se para tal, quatro casas a serem reforçadas; duas nos cantos, uma a meio de um alinhamento em banda mas mais alta, e outra, a meio de outro alinhamento com as mesmas características das vizinhas. Estas casas foram escolhidas com base nos resultados do modelo calibrado, mostrando-se as mais vulneráveis ao sismo com maiores tensões e deslocamentos. O modelo de pavimento reforçado consistiu na consideração das paredes calibradas em todas as casas mas com lajes com rigidez apenas nas casas referidas. Este reforço melhorou o comportamento e uniformizou a distribuição das tensões nas casas com lajes com rigidez, relativamente à hipótese de pavimentos sem rigidez, tendo-se no entanto observado localmente pequenos aumentos nos valores das tensões. De facto o reforço de uma casa torna-a mais rígida relativamente às vizinhas, transformando-a num elemento com maior capacidade de absorver cargas transmitidas pelas restantes estruturas.

Estes estudos evidenciaram a influência da parte no todo. Neste tipo de estruturas deve haver o cuidado na execução e estudo do reforço a realizar, devido a possíveis alterações no comportamento global que se pode estar a induzir. Melhorar os pavimentos de uma casa pode ser insuficiente ou mesmo nefasto se não se atender à qualidade das paredes resistentes. Recorde-se que este tipo de paredes tem um comportamento do tipo frágil, permitindo poucas redistribuições dos esforços gerados. Para além disso o valor elevado da aceleração vertical, no caso das paredes de alvenaria traz grandes problemas ao seu comportamento estrutural, dado que alivia o peso próprio desagregando-as com relativa facilidade.