

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA CONSTRUTIVO DO GRUPO CENTRAL DO ARQUIPÉLAGO AÇOREANO – UMA CONTRIBUIÇÃO PARA AVALIAÇÃO E REDUÇÃO DA SUA VULNERABILIDADE SÍSMICA

ANTÓNIO ARÊDE

Prof. Auxiliar
FEUP
Porto – Portugal

ANÍBAL COSTA

Prof. Catedrático
Univ. Aveiro
Aveiro – Portugal

ALEXANDRE A. COSTA

Investigador
FEUP
Porto – Portugal

C. SOUSA OLIVEIRA

Prof. Catedrático
IST
Lisboa – Portugal

FILIPE NEVES

Eng. Civil
Univ. Aveiro
Lisboa – Portugal

RESUMO

Sismos recentes continuam a evidenciar que a construção típica de moradias do grupo central do arquipélago açoriano, essencialmente baseada em alvenaria tradicional de pedra, apresenta particular vulnerabilidade sísmica resultante de deficiente comportamento para fora do plano das paredes. Por outro lado, na sequência do sismo do Faial/Pico a 9 de Julho de 1998, a reconstrução do parque habitacional tem passado muito pela adopção de um sistema construtivo menos habitual na região, baseado essencialmente em painéis de alvenaria de blocos de cimento confinados por cintas horizontais e montantes verticais de betão armado. Tanto num caso como no outro, é bem patente a falta de caracterização adequada da resposta estrutural sob solicitações que potenciem movimentos para fora do plano das paredes, como é o caso da acção sísmica. Por essa razão, foi recentemente encetada uma campanha de ensaios *in-situ* na ilha do Faial, com vista à obtenção de resultados experimentais conducentes a uma representação fidedigna da resposta estrutural de paredes de alvenaria de pedra tradicional e de alvenaria confinada de blocos conforme a realidade actual daquela e de outras ilhas. A presente comunicação destina-se assim a dar uma descrição geral dos ensaios realizados até ao presente, focando-se a atenção nos objectivos e em alguns resultados gerais mais representativos da resposta observada. São incluídas também breves referências aos esquemas de ensaio que, por sua vez, são objecto de maior detalhe numa outra comunicação apresentada a esta conferência pelos mesmos autores. Em virtude do carácter recente desta campanha, cujos resultados estão ainda em processo de análise, reserva-se para posterior divulgação maior detalhe da informação experimental que dela é possível extrair.

1. INTRODUÇÃO

A alvenaria é, juntamente com a madeira, o material de construção mais antigo utilizado pelo Homem. Embora seja um material já muito antigo, é frequentemente encontrado em construções recentes (menos de 50 anos) em vários pontos do nosso país. De facto, sabe-se que 63% dos edifícios existentes em Portugal é constituído por alvenaria [1], metade dos quais de alvenaria tradicional de pedra, o que atesta bem a incidência deste tipo de material na construção em Portugal, com particular relevância nas construções mais antigas, quer do continente quer das ilhas.

No caso do grupo central do arquipélago açoriano, a tipologia de moradias tradicionais assenta normalmente numa construção de paredes de alvenaria de pedra em duas folhas, onde o enchimento apresenta muito fracas características de resistência com pouca ou nenhuma coesão. O preenchimento das juntas nem sempre é feito com boa argamassa, levando assim a que, na maioria das vezes, as juntas possam ser consideradas do tipo seco. Acresce ainda que a resposta na direcção para fora do plano deste tipo de alvenaria tem sido um dos principais factores de colapso parcial ou total de estruturas, tipicamente devido à deficiente acomodação de deslocamentos nessa direcção quando sujeitas a excitações sísmicas, tal como se verificou durante o sismo do Faial/Pico a 9 de

Julho de 1998, onde várias habitações colapsaram devido principalmente a movimentos parciais ou totais de paredes para fora do seu plano.

Por outro lado, a evolução dos materiais bem como das metodologias construtivas, tem levado à modificação das formas de construção para configurações desejavelmente melhores (em termos de comportamento e de preço), das quais a alvenaria confinada de blocos é hoje um bom exemplo de utilização corrente em novas edificações nas ilhas do Faial e do Pico, nos Açores. A utilização frequente deste sistema construtivo parece no entanto carecer ainda de uma caracterização adequada da sua resposta estrutural sob acção sísmica, que permita avaliações credíveis do seu desempenho sísmico em termos de comportamento no seu próprio plano e (especialmente) para fora do plano.

Afigura-se assim urgente estudar correctamente o comportamento deste tipo de alvenarias (tradicional e de blocos), retratando correctamente as condições a que estas estão sujeitas *in-situ* procurando forçar movimentos no plano e fora do plano das paredes. A solução que se considerou mais adequada, embora seguramente não a mais simples, passou por realizar ensaios nos próprios edifícios, recorrendo a metodologias compatíveis com as condições existentes e com os objectivos pretendidos. Relativamente às condições existentes, são diversos os factores a atender, conforme se descreve numa outra comunicação a esta mesma conferência [2], mas é de realçar as dificuldades inerentes ao facto de se tratar de locais com marcadas deficiências de meios logísticos, numa ilha no meio do oceano Atlântico. Pese embora este facto, o sucesso desta primeira etapa desta campanha foi uma realidade inegável graças a inestimáveis ajudas da Delegação da Secretaria Regional da Habitação e do Equipamento dos Açores no Faial. Relativamente aos objectivos a atingir, importa evidenciar que foi necessário conceber todo um sistema autónomo capaz de impor forças e mobilizar as correspondentes reacções (sem envolver meios pesados) em regime cíclico, devidamente monitorizado em contínuo em termos de forças e deslocamentos.

Para ambos os casos de alvenaria (tradicional de pedra e mais recente de blocos confinada), foram realizados alguns ensaios que se podem considerar piloto a fim de, não só extrair resultados estruturais, mas também de aferir a viabilidade de todo o sistema experimental concebido. Nas secções seguintes apresentam-se os aspectos mais relevantes dos ensaios realizados, focando-se com mais detalhe uma breve interpretação do ensaio realizado numa casa de alvenaria de pedra de junta seca (Casa da Canada do Sousa) que, embora numa fase preliminar, permitiu já obter uma boa concordância com metodologias simples de previsão da carga de colapso de elementos deste tipo de parede.

2. PAREDE DE ALVENARIA DE BLOCOS DE BETÃO CONFINADA

2.1. Introdução

A resposta de painéis de alvenaria confinada de blocos sob acções para fora do seu plano pode ser encarada como resultado de dois efeitos distintos que se podem materializar em construções de carácter mais recente.

Por um lado poderá corresponder a uma situação de um pavimento (eventualmente laje em betão armado) ou de uma cobertura que se apoia sobre a cinta horizontal de confinamento de um dado painel de alvenaria, concentrando aí todas as forças de inércia horizontais decorrentes dos efeitos sísmicos sobre toda a massa do piso ou cobertura; nesse caso, a situação porventura mais crítica corresponderá a um painel central de toda uma parede longa de alvenaria, solicitada por acelerações sísmicas normais ao seu plano, e deficientemente travada nessa zona central.

Por outro lado, poderá advir de um caso de um painel devidamente travado contra movimentos fora do plano, travamento esse realizado na zona dos montantes verticais de cintagem. Neste caso as acelerações sísmicas horizontais exercidas sobre a massa distribuída do painel de alvenaria assumem um papel determinante na resposta, uma vez que geram forças horizontais distribuídas no painel e actantes para fora do seu plano como se tratasse de uma “laje de alvenaria vertical” apoiada sobre os elementos de confinamento no seu contorno.

Na prática, estas duas situações obrigam a outras tantas configurações de ensaio distintas que se descreve sumariamente na secção seguinte.

Por fim, a resposta estrutural deste tipo de painel sob acções horizontais (cíclicas em particular) no seu próprio plano é outro aspecto que interessa avaliar e está também inserido nos objectivos desta campanha. Porém, devido a dificuldades de capacidade de carga dos actuadores usados e de mobilização da correspondente reacção, este aspecto não pode ainda ser atendido, tendo ficado em suspenso até se materializarem as condições adequadas.

2.2. Esquemas de ensaio

Em face do exposto no ponto anterior, e de forma a testar o comportamento fora do plano de uma parede de alvenaria de blocos de betão confinada segundo as duas perspectivas enunciadas, foram realizados dois ensaios sobre a mesma parede conforme a seguir se descreve sumariamente.

Procurando simular o primeiro efeito acima referido, executou-se um primeiro ensaio que consistiu em aplicar uma força horizontal no topo da parede na zona central da cinta horizontal de topo tal como se pode observar na Figura 1-a). A força foi aplicada mediante um par de actuadores hidráulicos ligados em série para obter maior curso de deslocamento, ganhando reacção numa outra parede de alvenaria que se destinava também a ser testada no seu próprio plano mas que acabou por não o ser, pelos motivos já referidos.

Um segundo ensaio sobre o mesmo painel de parede teve como objectivo reproduzir o segundo efeito acima descrito, i.e. o das forças distribuídas no próprio painel. Tal como se ilustra na Figura 1-b), a carga foi aplicada a meia altura do painel de alvenaria confinado, através de um perfil metálico de distribuição com 1.2 m de comprimento, por sua vez apoiado em 8 barrotos de madeira (também de 1.2 m cada) formando assim uma grelha de distribuição da carga com 1.2x1.2 m². A fim de se efectuar um carregamento cíclico, a parede foi furada em quatro posições para dar passagem a quatro varões roscados de aço e ligados (por aparafusamento) no lado posterior a um perfil metálico idêntico e a barrotos dispostos de forma semelhante ao lado anterior. Note-se que neste segundo ensaio, o topo do pórtico de confinamento foi ligado à parede de reacção através de um perfil metálico, conduzindo assim a uma situação de apoios horizontais com liberdade de rotação em todo o contorno já que no primeiro ensaio se haviam formado rótulas plásticas na base dos montantes verticais e o painel de alvenaria havia exibido um claro efeito de “rocking” na base.

A força aplicada pelos actuadores foi lida por uma célula de carga, enquanto que as deformações da parede foram medidas com recurso a transdutores de fio colocados na parte posterior da parede ensaiada e fixos a uma estrutura de referência externa a todo o sistema.



a)



b)

Figura 1: Esquema de ensaio para alvenaria de bloco: a) carga no topo; b) carga distribuída no plano.

2.3. Breve descrição do comportamento observado

Em virtude da maior rigidez do pórtico de cintagem em betão armado face à alvenaria de blocos furados de cimento, o resultado desta solicitação no primeiro ensaio introduziu um esforço transversal que se encaminhou essencialmente para a estrutura de betão armado, responsável por momento flector que materializa rótulas plásticas na base dos montantes verticais. A resistência final do conjunto correspondeu assim à resistência conferida pelas secções desses montantes (como seria de esperar e conforme se confirmou em face da armadura neles existente e da força máxima que foi possível aplicar no ensaio). O comportamento global do painel de alvenaria e respectivo pórtico de confinamento em betão armado, correspondeu a “rocking” precedido pela abertura progressiva de uma fenda na base ao longo da qual a alvenaria se destacou da fundação ao longo do seu comprimento. O perfil deformado da parede encontra-se documentado na Figura 2-a).

Já no segundo ensaio a parede de alvenaria confinada apresentou as linhas de rotura esperadas para uma parede com as condições de apoio desta ao longo dos quatro lados, conforme se pode observar na Figura 2-b). A título de informação de maior relevo, regista-se que a maior força atingida ronda os 110kN, o que corresponderia sensivelmente a uma aceleração de 3,68 g actuando de modo uniforme em todo o painel. Em termos algo preliminares, pode-se constatar que o comportamento fora do plano deste tipo de alvenaria é muito satisfatório.



Figura 2: Aspecto final da parede de alvenaria confinada de blocos após o ensaio: a) força aplicada no topo do painel; b) força aplicada a meio do painel.

3. SISTEMA DE ENSAIO USADO PARA ENSAIOS EM HABITAÇÕES TRADICIONAIS

A ideia básica subjacente ao sistema utilizado para realizar os ensaios em construções habitacionais existentes consistiu sempre em tirar partido de paredes opostas, ensaiadas em simultâneo, cada uma servindo de apoio à outra de forma a materializar o efeito de acção-reacção. O sistema é descrito com detalhe noutra comunicação elaborada por estes mesmos autores e apresentada a esta conferência [2], mas de forma resumida adianta-se aqui os aspectos mais relevantes.

Assim, de forma a evitar o uso de estruturas de reacção pesadas e a possibilitar maior facilidade no transporte de todo o material, os actuadores hidráulicos foram colocados no interior das habitações e fixos às paredes por meio de ligações rotuladas nas duas extremidades. Naturalmente houve que recorrer a longas metálicas, especificamente dimensionadas para este efeito, com bom comportamento em tracção e compressão, e reduzido peso. Em termos de estruturas auxiliares, foram apenas usados andaimes correntes para servir de fixação aos transdutores de deslocamentos e também de forma a materializar uma torre de apoio para montagem e elevação dos elementos hidráulicos com a ajuda de um pequeno guincho (Garibaldi).

A solicitação foi então aplicada no topo das paredes junto ao apoio da cobertura, sob a forma de forças estáticas crescentes por ciclos repetidos e alternados, procurando simular (apenas de forma quase-estática) a acção das

coberturas neste tipo de habitações. Actuando perpendicularmente ao plano da parede, este sistema de forças simulou assim o processo de abertura e fecho de paredes opostas passível de ocorrência durante a acção dum sismo. Para cada ensaio a zona de aplicação das cargas foi centrada num nêmo de parede e distribuída ao longo do seu comprimento através de guias de madeira horizontais (cerca de 1,2 m para cada lado do ponto de aplicação da carga).

O controlo dos actuadores hidráulicos foi realizado em termos de deslocamento conforme a fase de ensaio e a medição de deslocamentos foi sempre efectuada relativamente a estruturas de referência consideradas “fixas” através de transdutores de fio que permitiam cursos variáveis consoante o local de medição (o curso máximo possível foi de +/- 200mm, que na realidade ficou condicionado pelo curso dos actuadores). O sistema de controlo de actuação permitia comandar os eixos hidráulicos baseados num destes transdutores, com a funcionalidade de, ao longo do ensaio, poder ainda alterar o transdutor de controlo; este aspecto revelou-se de particular utilidade em face das características próprias destes ensaios. Dos pontos de medição nas paredes até aos transdutores fixos às estruturas de referência foram usadas extensões de fio de aço inoxidável com deformabilidade e de massa irrelevantes para o comprimento em questão.

Os pontos de medição de deslocamentos foram sempre escolhidos segundo uma configuração em T, no plano da parede a ensaiar. Assim, três transdutores foram localizados segundo o alinhamento horizontal do ponto de aplicação da carga, ficando um junto a este ponto e outros dois afastados de 1 a 2 metros de modo simétrico em relação ao primeiro; outros três transdutores foram colocados na vertical do ponto de aplicação, permitindo estes obter o perfil vertical de deformação enquanto os primeiros registavam as deformações ao longo do coroamento da parede. Este processo e configuração de medição foi feito sempre em ambas as paredes que estavam a ser solicitadas o que naturalmente possibilitou resultados de força - deslocamento em duas paredes diferentes simultaneamente durante cada ensaio.

O esquema de ensaio acima descrito encontra-se ilustrado em diversas figuras ao longo das secções seguintes.

4. CASA TÉRREA NA FREGUESIA DE SALÃO

4.1. Caracterização da habitação

A casa em apreço nesta secção foi seleccionada para ensaio devido à sua reduzida altura (piso térreo), à facilidade de acesso, à possibilidade de serem realizados múltiplos ensaios e também por incluir duas tipologias de alvenaria. Trata-se de facto de uma casa de um único piso com planta em L (Figura 3-a), originalmente construída em alvenaria de pedra de folha dupla e de fracas características resistentes, à qual foi acrescentado um anexo em alvenaria não confinada de blocos de betão com cobertura em chapa ondulada ligeira. A estrutura principal encontrava-se bastante danificada pelo sismo e já desprovida de cobertura. Por sua vez o anexo não apresentava qualquer dano, possuindo a respectiva cobertura no seu lugar original. Na Figura 3-b) e c) apresentam-se registos fotográficos do sistema de aplicação de carga já montado nos locais 1 e 2 escolhidos para ensaio e referenciados na planta ilustrada na Figura 3-a).

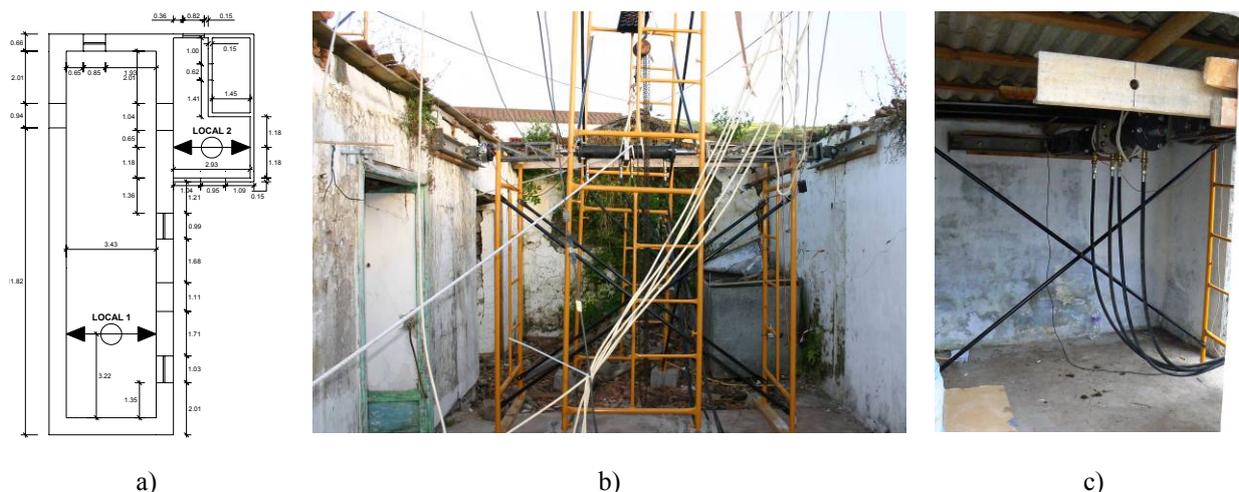


Figura 3: Casa térrea na freguesia de Salão: a) planta; b) local de ensaio 1; c) local de ensaio 2.

Um factor relevante que influenciou a escolha da posição do ensaio 1 foi a presença de um tirante de madeira da antiga cobertura apoiado nas duas paredes opostas de fachada e de tardoz, o que poderia dar alguma rigidez às paredes principalmente no sentido de fecho dos actuadores (i.e. sentido de aproximação das paredes) fazendo a função de uma escora. No entanto, tal como correntemente se encontra nas mais diversas construções desta ilha, esse barrote encontrava-se apenas simplesmente apoiado sem uma ligação eficiente às paredes, para além de se apresentar visivelmente deteriorado. Optou-se então por retirar o referido barrote de madeira pois poderia danificar alguns componentes do sistema de ensaio no decurso deste.

Por outro lado, o local de ensaio 2 tinha como objectivo estudar simultaneamente dois materiais usuais em construções de alvenaria nesta ilha. Porém, constatou-se ainda que a parede de alvenaria de blocos estava ligada nos seus cunhais a duas paredes ortogonais o que permitiu também estudar o efeito destas paredes no comportamento global da parede ensaiada.

4.2. Breve descrição do comportamento observado

O facto de a aplicação das forças ser feita segundo o princípio da acção-reacção, mobilizando sempre duas paredes opostas em simultâneo, permitiu avaliar as características da resposta de ambas apenas com um ensaio pese embora não se tenha podido atingir o mesmo nível de deslocamento absoluto em cada uma delas. De facto, tomando como referência o ensaio 1, do lado da fachada sem aberturas a parede apresentava maior rigidez tendo portanto sofrido menores deslocamentos e, conseqüentemente, conduziu a maiores deformações da parede oposta onde existiam portas e janelas. A título meramente informativo, regista-se que nesse ensaio se atingiu uma força máxima de 9,8 kN para um deslocamento de 108 mm (cerca de 6 % drift), o que aproximadamente corresponde a uma aceleração de cerca de 0,15 g, tomando como estimativa de massa envolvida nesse movimento a que está associada ao nembro em estudo e respectivas padieiras adjacentes (cerca de 6,7 ton).

De igual modo foi possível no ensaio 2 avaliar simultaneamente a resposta dos dois tipos de alvenaria envolvidos, a tradicional de pedra e a de blocos de cimento. Neste caso verificou-se que o nembro de alvenaria de pedra foi o elemento mais fraco por ter sofrido deslocamentos absolutos bem maiores do que a parede de blocos a que correspondeu uma notável perda de resistência medida ao longo do ensaio e em estreita concordância com o dano que visivelmente se foi instalando. De salientar que neste ensaio a resistência da parede de alvenaria de blocos em estudo foi notoriamente beneficiada pela contribuição das duas paredes de blocos que lhe são ortogonais. De facto, o embricamento de tijolos no cunhal determinou um funcionamento de conjunto como uma parede em L e que ficou evidenciado por os danos observados se resumirem essencialmente a destacamentos nas ligações às restantes paredes, conforme se evidencia na Figura 4-a) relativa ao contacto entre a parede de blocos e o nembro de pedra. De igual forma, a existência de uma pequena parede orthogonal interior na divisão materializou um apoio para a parede de blocos sujeita às cargas fora do plano, apoio esse mais eficaz no sentido de fecho dos actuadores e que exibiu fendas de destacamento conforme ilustrado na Figura 4-b).



Figura 4: Destacamento entre as paredes paralelas aos actuadores e as paredes ensaiadas para fora do plano, nomeadamente: a) a parede exterior de pedra e b) a parede de blocos da divisória interior.

Finalmente, a deformação em altura da parede de alvenaria de pedra parece ter uma componente importante de rotação em torno da linha de ligação à fundação, sendo que as padieiras por cima das aberturas pareceram evidenciar um certo grau de articulação nas suas ligações aos nembos. Em fase de abertura dos actuadores, a deformação foi provocando destacamento progressivo do reboco das paredes e, à medida que este foi desaparecendo, foi possível observar que as pedras “maiores” existentes junto às aberturas desempenhavam um papel importante na resposta do nembro em estudo.

5. CASA NO LUGAR DA CANADA DO SOUSA

5.1. Caracterização da habitação

A casa da Canada do Sousa, situada próximo da entrada nascente da povoação dos Cedros, é uma construção típica da zona realizada com pedra bem aparelhada e materializando paredes de alvenaria de duas folhas. Apresenta cunhais de “cantaria bem imbricada” com “camas” formando fiadas horizontais onde alternam pedras de grandes dimensões segundo o alinhamento da parede com outras pedras (ligadores ou juntouros) que ligam as duas folhas das paredes. É uma casa de dois pisos, rés-do-chão amplo (usualmente destinado a estábulos ou armazém agrícola) e primeiro andar de habitação com escadas de acesso pelo exterior, conforme se pode visualizar nas fotografias da Figura 5 e na representação esquemática da Figura 6; nesta última, que inclui as dimensões da construção, está também representada a posição onde foram colocados os actuadores hidráulicos.



Figura 5: Vistas gerais da casa da Canada do Sousa.

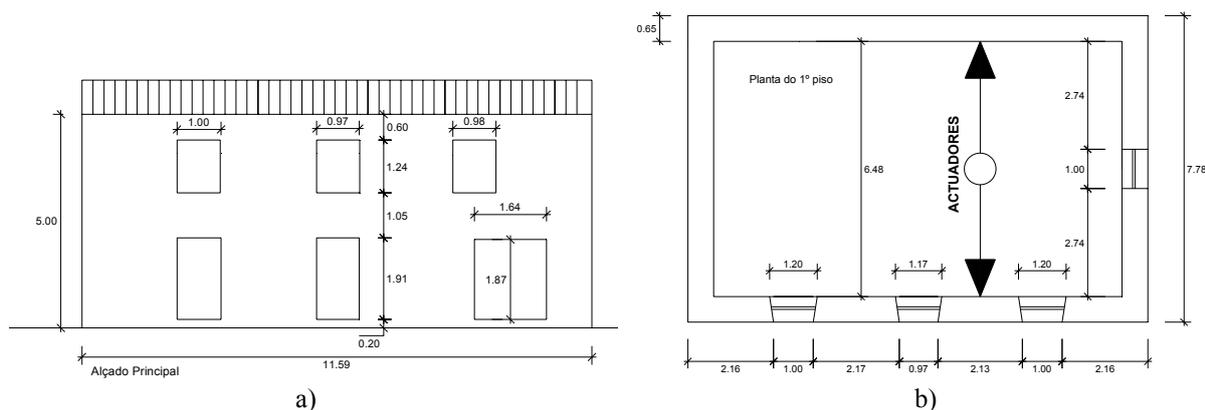


Figura 6: Casa da Canada do Sousa: a) alçado principal; b) planta do 1º piso.

A parte inferior apresenta duas portas e uma grande abertura que quebra a simetria da fachada a esse nível, certamente para dar acesso a algum veículo de maior largura; na parte superior a fachada apresenta três janelas em disposição simétrica. Lateralmente, a casa tem empenas praticamente “cegas” com forma triangular na parte da cobertura que, portanto, é realizada por duas águas correndo no sentido das fachadas principal e de tardoz. A moradia encontra-se parcialmente enterrada uma vez que o terreno se eleva na parte posterior, contribuindo como factor muito importante para uma resistência desta parede mais elevada que a da fachada principal. Do lado Norte (à direita, estando-se posicionado de frente para a casa) existe a escada de acesso ao 1º andar realizada em degraus de pedra bem aparelhada; a pedra de toda a construção é traquito vulcânico da região.

Este género de habitações são frequentes por toda a encosta Norte da Ilha do Faial, muitas em estado de grande degradação e aparentando nunca terem sido objecto de qualquer tipo de intervenção. A casa em estudo já não apresenta cobertura e mostra sinais evidentes da acção do sismo de 1998. É um tipo construtivo de pedra sobre pedra (junta seca) sem qualquer ligante que funciona por acção gravítica e não apresenta qualquer tipo de revestimento nem por fora nem por dentro. A estrutura do pavimento pensa-se que deveria ser constituída por barrotes de madeira com pranchas de soalho [5]. A cobertura é constituída geralmente por barrotes de madeira apoiados em paredes mestras dando apoio a telhas tipo canudo (provavelmente originárias da ilha da Graciosa, como é habitual na região). Apenas foi possível visualizar indícios de argamassa de assentamento das telhas na ligação destas às paredes. A abertura larga no r/c era suportada por uma grande padieira de pedra vencendo um vão de aproximadamente 2 metros que se encontra partida (provavelmente durante o sismo) conforme se pode observar na parte esquerda da Figura 5-b).

Da inspecção visual da construção, pode-se afirmar que o sismo afectou a estrutura de forma acentuada; porém, esta constatação resulta de uma análise bastante atenta e com algum detalhe, uma vez que não existindo rebocos que normalmente evidenciam a concentração de danos, uma mera observação ligeira não permite identificar a extensão de danos realmente ocorridos. De facto, uma identificação mais atenta mostra ainda que a casa está deformada nas empenas com embarrigamentos proeminentes para Sul (Figura 7). Idêntica deformação da fachada principal é visível também ao nível dos alinhamentos do 1º piso e “macro-fissuração” (abertura de pedras) diagonal, quer da fachada principal quer da empena virada a Norte. Este conjunto de deformações existentes denuncia que terá ocorrido um movimento do solo com predominância na direcção N-NW (Figura 8), bem como uma importante componente vertical.



Figura 7: Movimento fora do plano da empena.

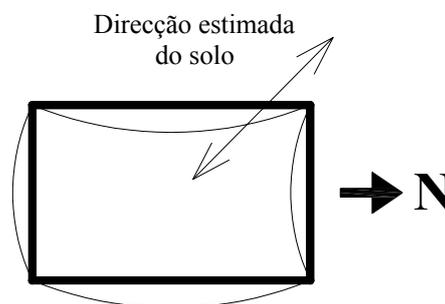


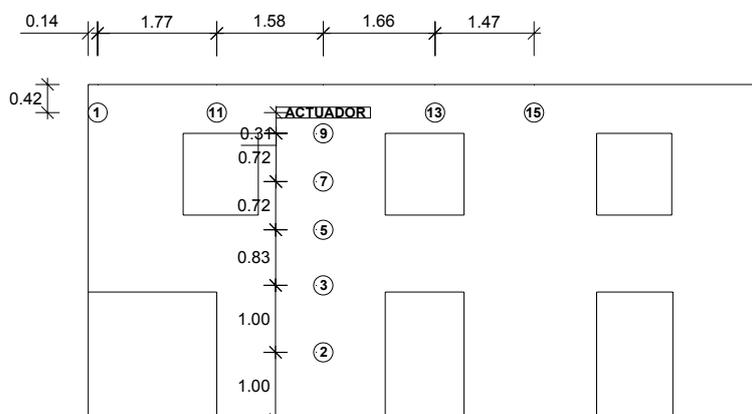
Figura 8: Direcção estimada do solo.

A estrutura foi ensaiada através de uma força aplicada a nível da cobertura na direcção perpendicular ao desenvolvimento das paredes, sobre uma zona de nabo conforme ilustrado na planta da Figura 6-b), com o objectivo de reproduzir a acção da cobertura na estrutura quando sujeita a uma acção sísmica.

Na Figura 9-a) apresenta-se uma vista geral do esquema de ensaio utilizado, assim como os pontos que foram monitorizados na fachada principal, correspondendo os números assinalados ao número do transdutor utilizado; na parede de tardoiz foi utilizado um esquema de monitorização idêntico. Os actuadores foram colocados em altura na posição apresentada Figura 9-b).



a)



b)

Figura 9: Esquema de ensaio utilizado: a) vista geral; b) pontos monitorizados.

5.2. Resultados obtidos

O processo de aplicação da carga foi semelhante ao anteriormente descrito para os outros casos já apresentados. Alguns resultados são seguidamente descritos, não de forma exaustiva, pretendendo apenas evidenciar o comportamento global da parede ensaiada.

A estrutura desta casa possui uma tipologia que permite uma definição muito clara das zonas mobilizadas da parede, o que possibilitou uma simples estimativa da envolvente de resistência lateral máxima espectável para o nembro que foi ensaiado. Assim, partindo de uma análise de equilíbrio limite, onde a condição de forças compatíveis com o equilíbrio do sistema se impõe recorrendo à equação (1) e na qual a resistência à tracção das juntas é admitida nula, é possível estimar a força máxima H_{topo} no topo da parede a partir da equação (2). Nestas equações, h_{topo} representa a altura do topo da parede (no caso presente, do bloco de parede em estudo), W o seu peso e t a sua espessura.

$$M_0 = H_{topo} \cdot h_{topo} - W \cdot \frac{t}{2} = 0 \text{ (Equilíbrio limite do bloco)} \quad (1)$$

$$\Leftrightarrow H_{topo} = \frac{W \cdot t/2}{h_{topo}} \quad (2)$$

De forma a determinar a força de estabilidade resultante apenas do peso próprio do nembro mobilizado, o peso volúmico foi considerado igual ao valor médio determinado em estudos anteriores por Costa [3] ($\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$). Os restantes valores foram obtidos por levantamento geométrico das propriedades da parede ($l = 2.13 \text{ m}$, $t = 0.66 \text{ m}$, $h = 5.0 \text{ m}$, $h_{topo} = 4.6 \text{ m}$), dos quais facilmente se obtém o peso W valendo 127.1 kN. Substituindo estes valores em (2) obtém-se:

$$\Rightarrow H_{topo} = 9.1 \text{ kN}$$

A partir deste valor de força máxima, e o deslocamento máximo permitido que respeita o equilíbrio do sistema ($d_{max} = t/2 = 0.33 \text{ m}$), é possível obter a envolvente máxima prevista para a resposta da parede dada pela linha a tracejado na Figura 10, pois para $d = 0 \text{ m} \rightarrow H_{topo} = 9.1 \text{ kN}$ e para $d = d_{max} \rightarrow H_{topo} = 0 \text{ kN}$. Na mesma figura são apresentados igualmente os resultados obtidos para as paredes ensaiadas (fachada e tardez), sendo de salientar os valores obtidos para a parede da fachada (nembro ensaiado) que apresentam muito boa concordância com a estimativa acima obtida para a força horizontal limite.

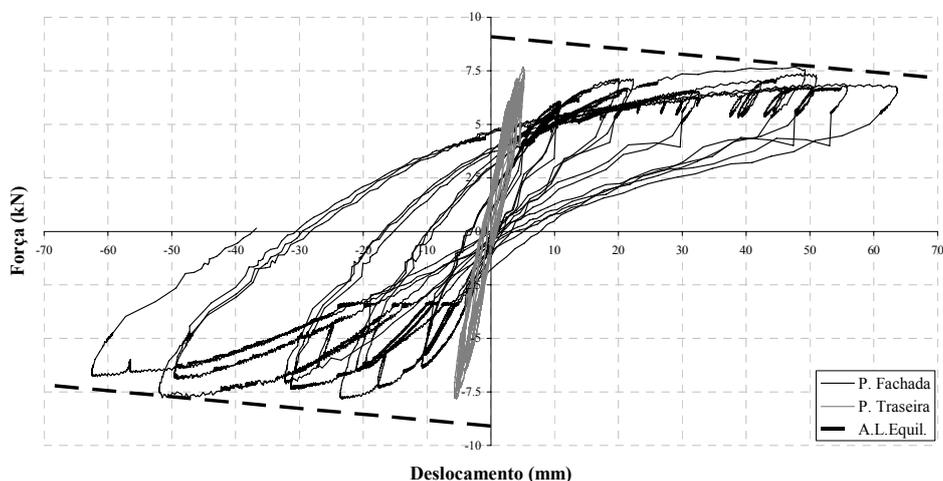


Figura 10: Força vs. Deslocamento.

Na mesma Figura. 9, verifica-se que a parede apresentou muito boa dissipação de energia acompanhada de perda de rigidez ao longo do ensaio que se torna muito acentuada a partir de cerca de 5mm de deslocamento, ou seja cerca de 0,1% de *drift* total. Em termos de resistência verifica-se que começa a haver degradação a partir de 50-60mm, portanto em torno de 1,2% de *drift*. O andamento da curva envolvente da resposta indicia uma tendência muito forte para rápida perda de resistência, de tal modo que, uma mera extrapolação esboçada dessa envolvente sugeriria o anulamento total de resistência para deslocamentos da ordem de 100 a 120mm (*drift* cerca de 2,5%). Este valor ficaria bastante aquém do deslocamento máximo teórico de 330mm estimado através da análise limite, o que apontaria para deficiente capacidade da parede para acomodar deslocamentos para fora do plano mantendo uma adequada reserva de resistência. No contexto do comportamento fora do plano deste tipo de alvenaria este

pode ser de facto o aspecto crítico em condições sísmicas reais, pois se os deslocamentos residuais se mantêm significativos (como é o caso presente num dos sentidos da resposta) pode ocorrer instabilidade que conduz ao colapso destes elementos.

Ainda na Figura 10 pode observar-se que a parede traseira funcionou mais como estrutura de reacção pois o nível de deslocamentos máximos atingidos foi muito mais reduzido (5 mm) do que a parede de fachada, permitindo assim que fosse esta a mais carregada e explorada em termos de regime de comportamento não linear.

Para evitar o colapso da estrutura, as forças e deslocamentos aplicados não se aproximaram de valores críticos, embora fosse notória a perda de resistência da parede de fachada. No entanto, de forma a procurar averiguar se, pelo menos de forma tendencial, se mobilizam as condições de funcionamento assumidas inicialmente para prever a resposta limite do nêmo mais solicitado, apresentam-se na Figura 11 os perfis vertical e de horizontal de deslocamentos associados ao máximo atingido durante o ensaio; tal como na figura anterior, considera-se positivo o deslocamento das paredes para o exterior.

Através da Figura 11-a) é então possível observar que, conforme se supôs, houve realmente mobilização total da zona do nêmo ensaiado, pois existiram deslocamentos desde o piso térreo e não somente a partir do 1º piso. O perfil de deslocamentos vertical apresenta evoluções distintas entre o sentido positivo e negativo, apesar de o valor máximo (próximo do ponto mais solicitado) ser de idêntica grandeza. Conjugado com a observação do perfil horizontal da Figura 11-b), percebe-se que o movimento de aproximação entre as paredes fica mais restringido do que o afastamento entre as mesmas, por clara influência da parede ortogonal adjacente (conforme se procura realçar com as setas incluídas na mesma figura). Isto justifica também o andamento marcadamente assimétrico do diagrama ilustrado na Figura 10, onde o efeito da parede de retorno é significativo. Tal não seria tão pronunciado se a resistência ao corte das juntas fosse elevada mobilizando parcialmente a parede de retorno devido à força de atrito daí resultante, como demonstrado por [6]. Percebe-se então que, no movimento para o exterior a perda de rigidez da parede da fachada manteve-se ainda na descarga enquanto a abertura de juntas no cunhal não foi anulada; quando tal aconteceu, a rigidez da parede ortogonal da empena foi então fortemente activada surgindo assim o correspondente efeito bem marcado no diagrama força-deslocamento. Além disso, a variação brusca de pendente no perfil vertical (Figura 11-a) no sentido da aproximação entre paredes deverá estar relacionada com a redução de rigidez que ocorre na transição para a zona das janelas.

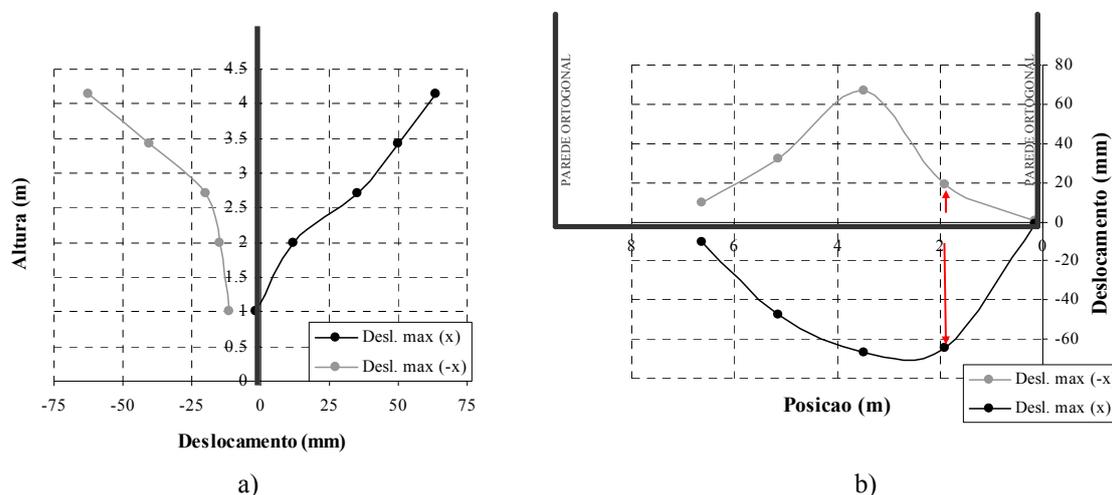


Figura 11: Perfil de deslocamentos na parede de fachada: a) vertical, no alinhamento da força; b) horizontal, próximo do nível do actuador.

5.3. Incursões dinâmicas

No final do ensaio cíclico quasi-estático, e sem que tal estivesse nos propósitos previstos desta campanha, foi possível excitar dinamicamente a parede utilizando os actuadores hidráulicos usados anteriormente. Assim, através de sucessivas inversões cíclicas do sentido do deslocamento (de pequena grandeza) com redução

progressiva do período de excitação, foi possível observar o que deverá corresponder ao 1º modo de vibração da parede, englobando uma deformação transversal global de toda a fachada com simples curvatura em planta conforme esquematizado na Figura 12-a). Além disso, aumentando mais a frequência de excitação, foi possível ainda observar um outro modo de vibração (muito provavelmente o 2º modo transversal) que exibiu uma deformada da parede em dupla curvatura, também esboçado na Figura 12-b).



Figura 12: Modos transversais de vibração identificados (em planta): a) 1º modo; b) 2º modo.

Os esboços apresentados resultam apenas da clara percepção visual durante o ensaio, mas podem ser certamente confirmados do tratamento exaustivo dos resultados obtidos com a instrumentação usada. Todo esse tratamento de dados não está ainda concluído, pelo que não se detalha mais esse aspecto neste artigo. Por outro lado, dado que estas “incursões dinâmicas” não estavam previstas e também por indisponibilidade de equipamento, não foram feitos registos dinâmicos com acelerómetros como seria próprio de uma campanha dinâmica. No entanto, de análises preliminares aos perfis horizontais de deslocamentos e sua evolução temporal, foi possível estimar em cerca de 2.1Hz a frequência do que foi considerado como o 1º modo e em cerca de 2.6Hz a do 2º modo. O primeiro valor está em relação de concordância com uma medição de frequências que havia sido feita pelos autores em 1999 durante uma campanha anterior de ensaios e caracterização dinâmica após o sismo [4]. Nessa altura havia sido medido cerca de 3Hz para a frequência fundamental que, para a configuração desta casa é seguramente a ilustrada na Figura 12-a); este valor mais elevado está de acordo com o facto de a estimativa mais actual (2.1Hz) ter sido obtida após a degradação forçada de rigidez provocada pelos prévios ensaios cíclicos quase-estáticos.

6. CONCLUSÕES

Ao longo deste artigo procurou dar-se uma perspectiva global duma campanha recente de ensaios cíclicos quase-estáticos realizados em construções reais da ilha do Faial que haviam sido sujeitas à crise sísmica de 1998.

Sem entrar em demasiado detalhe, ficou bem patente a viabilidade de realização deste tipo de ensaios tirando partido de construções abandonadas, e destinadas certamente a demolição ou apenas a memória de um sismo passado, com vista à obtenção de caracterizações experimentais de paredes de alvenaria tradicional nas condições em que realmente existem in-situ.

Por outro lado, através da exposição de alguns resultados preliminares disponíveis, é notória a qualidade e a riqueza de informação que destes ensaios pode ser extraída, tendo em vista sobretudo as possibilidades que se abrem à calibração de modelos numéricos de simulação da resposta estrutural deste tipo de construções de alvenaria.

Esta campanha enquadra-se assim na actividade que vem sendo desenvolvida pelos autores neste domínio, que tem passado por diversos estudos de simulação numérica do comportamento sísmico de construções tradicionais dos Açores (Faial em particular) e em que tem estado sempre patente a incerteza de uma adequada caracterização material. A tentativa de incluir modelos não-lineares de comportamento adequados, obriga de a que se disponha de resultados como os aqui apresentados de forma preliminar, sob pena de o realismo de qualquer análise numérica não ter contrapartida real.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento ao Governo Regional dos Açores, na pessoa do Senhor Secretário Regional da Habitação e Equipamentos, Dr. José Contente, ao Delegado da Secretaria Regional da Habitação e Equipamento no Faial, Dr. João Bettencourt e ao Presidente da SPRHI, S.A., Eng. Fernando Nascimento e ao Senhor Constantino, técnico fiscal da Secretaria Regional da Habitação e Equipamento no Faial pelo apoio concedido e por todos os meios postos à sua disposição e sem os quais este trabalho não poderia ser desenvolvido.

Este artigo refere investigação realizada com o apoio financeiro da "FCT - Fundação para a Ciência e Tecnologia", Portugal.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Censos 2001 (2002) INE, Lisboa.
- [2] Costa, A. A., Costa, A., Arêde, A. Oliveira, C. S. e Neves, F. (2007) “Metodologia da preparação de ensaios a realizar na ilha do Faial, Açores”, SÍSMICA 2007 – 7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, FEUP, Porto.
- [3] Costa, A. (2002) Determination of mechanical properties of traditional masonry walls in dwellings of Faial Island, Azores, *Journal of Earthquake Engineering & Structural Dynamics*. Volume 31, Issue 7, pp. 1361 – 1382.
- [4] Costa, A. (1999) “Ensaio de Caracterização de Alvenarias Tradicionais”, ISBN:972-98312-0-3, Editado por M.M.-Trabalhos de Engenharia Civil, Lda.
- [5] Costa, A. G.; Oliveira, C. S.; Neves, F. (2007) Caracterização do Parque Habitacional da Ilha do Faial e Pico. Elementos de Estudo do Comportamento relativo à Crise Sísmica de 9 de Julho de 1998 nos Açores. SÍSMICA 2007 – 7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, FEUP, Porto.
- [6] De Felice, G. e Giannini, R. (2001) “Out-of-plane seismic resistance of masonry walls”, *Journal of Earthquake Engineering*, Volume 5, No. 2, pp. 253-271.