AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO FORA DO PLANO DE PAREDES DE ALVENARIA DE ADOBE

Aníbal Costa[1], Humberto Varum[1], Henrique Pereira[1], Hugo Rodrigues[1], Romeu Vicente[1], António Arêde[2] e Alexandre A. Costa[2]

Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro
Campus Universitário de Santiago, 3810-183 Aveiro, PORTUGAL
Tel.: +351 234 370 938; Fax: +351 234 370 094; E-mail: hvarum@civil.ua.pt
Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
R. Dr Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, PORTUGAL
Tel.: +351 225 081 845; Fax: +351 225 081 835; E-mail: aarede@fe.up.pt

Tema 2: Materiais e Comportamento

Palavras-chave: Paredes de Adobe, Ensaios In Situ, Comportamento Cíclico

Resumo

Com vista a colmatar a escassez de informação acerca do comportamento e propriedades mecânicas das construções em alvenaria de adobe existentes na região de Aveiro, tem-se vindo a realizar várias campanhas experimentais. Procurando identificar aspectos tais como a rigidez, a capacidade resistente, a dissipação de energia e os mecanismos de colapso, essas campanhas têm incluído levantamentos dimensionais, estudos da composição granulométrica dos diferentes adobes da região, ensaios de caracterização do comportamento mecânico deste material (em tracção e compressão), ensaios cíclicos quase-estáticos em alvenaria (fora do plano e no plano), ensaios de caracterização dinâmica, etc.

Neste artigo apresentam-se os principais resultados de um ensaio cíclico quase-estático para fora do plano, complementado com ensaios dinâmicos realizados sobre paredes de alvenaria de adobe de uma construção existente. Procura-se assim contribuir para uma melhor caracterização das construções já edificadas, tendo em vista a interpretação das patologias estruturais mais comuns, a calibração de modelos numéricos, a avaliação da segurança e o desenvolvimento de adequadas soluções de reforço.

1. Enquadramento e objectivos

Em Portugal, a construção em alvenaria resistente em adobe encontra na região de Aveiro a sua maior implantação. Impulsionada em finais do séc. XIX, teve o seu auge na primeira metade do séc. XX, mas veio sendo gradualmente abandonada nos anos sessenta até ao seu desaparecimento como técnica construtiva. Actualmente são ainda vários os exemplos de património histórico edificado neste tipo de alvenaria, sobretudo ligados à Arte Nova que constituiu o movimento artístico e arquitectónico dominante à época. Do mesmo modo, pese embora o estado de degradação que exibem, são ainda inúmeros os exemplos de edifícios de habitação e serviços (alguns de dimensões consideráveis) que continuam a satisfazer as funções para as quais foram projectados e assim vão atestando a longevidade do adobe como material de construção [1, 2].

Na região o emprego deste material era feito sobretudo na construção de casas e muros, embora sejam conhecidas outras utilizações, como a construção de muros de suporte de terras ou até mesmo de poços de água. De tal forma se faz ainda sentir a presença da construção em adobe na região que, segundo dados do município de Aveiro, cerca de 20-25% da construção existente na cidade é em adobe, fracção esta que aumenta para 35-40% no conjunto de toda a região.

O adobe não foi somente utilizado em construções pequenas e modestas, como por exemplo casas rurais, arrecadações, armazéns, muros de propriedades ou poços de água. Trata-se de um material empregue em obras mais nobres e ricas que nos nossos dias têm um elevado valor histórico e cultural, nomeadamente igrejas, casas de espectáculos, grandes mansões, algumas destas com uma arquitectura de estilo Arte Nova.

Os materiais de construção, as técnicas e as soluções construtivas tendem a ser fortemente influenciados pelo poder económico dos proprietários. No entanto, dada a limitação de

disponibilidade de outros materiais na região, o adobe foi utilizado de uma forma generalizada durante um largo período na região de Aveiro.
Actualmente é evidente o nível de degradação e abandono patente nas construções em adobe da região de Aveiro. Contudo, pode-se ressalvar casos em que as construções se encontram plenamente capazes de cumprir as funções para as quais foram pensadas e construídas, necessitando apenas para tal de pequenas obras de manutenção e conservação. No entanto, a demolição tem sido a solução geralmente adoptada para estas construções, tendo-se porém nos últimos anos recorrido pontualmente à reabilitação e reforço das construções em adobe por parte de alguns proprietários sensibilizados com a sua salvaguarda e preservação.
A opção de reabilitar apresenta dificuldades acrescidas devido à falta de informação sobre as propriedades e caracterização mecânica do adobe, sendo necessários estudos técnicos para determinar propriedades tais como o módulo de elasticidade, a resistência à compressão, à tracção e ao corte ou a sua composição, entre outros.
A caracterização mecânica dos blocos de adobe e das argamassas, bem como das próprias alvenarias em adobe, são instrumentos fundamentais na avaliação da segurança e de valiosa utilidade no apoio à realização de projectos de reabilitação e reforço deste tipo de alvenaria resistente [3].

2. O material – adobe

Regra geral, os blocos de adobe eram realizados com terra arenosa húmida, que depois de amassada e colocada em formas, era seca ao sol. Para o melhoramento do seu desempenho mecânico era relativamente frequente a inclusão de cal e por vezes de palha. As dimensões correntes, pese embora a existência de inúmeras tipologias identificadas, variavam sobretudo consoante o uso, sendo de aproximadamente $0.45\times0.30\times0.15m^3$ quando utilizados em casas e de $0.45\times0.20\times0.15m^3$ quando utilizados na construção de muros.
Sendo pouco resistente à água, o adobe em paredes é assente sobre um primeiro alicerce em pedra, evitando o contacto directo com o solo, de forma a protegê-lo da humidade ascensional. No caso dos poços de água, a opção por uma composição melhorada do adobe com recurso à adição de cal garante o adequado comportamento e durabilidade, apesar do contacto directo com a água.
Nas construções de adobe encontram-se frequentemente soluções simples e engenhosas destinadas a melhorar a limitada resistência do material, tais como a utilização de barrotes de madeira, arcos mais ou menos elaborados realizados com os mais diversos materiais (pedra, madeira, tijolo e até em adobe), por forma a vencer os vãos das aberturas e melhorar a distribuição das cargas nos elementos estruturais.
A grande heterogeneidade de dimensões e de constituição dificulta a caracterização e o estudo da construção em adobe. É possível encontrar paredes resistentes realizadas em adobe extremamente fraco, como por exemplo em terra preta (rica em matéria orgânica), ou em adobe melhorado com inclusão de palha para melhorar as suas propriedades mecânicas. Em alguns casos encontra-se na mesma parede diferentes tipos de adobe misturados de uma forma mais ou menos aleatória com outros materiais, como por exemplo a pedra.
Resultados obtidos de ensaios de compressão simples em blocos de adobe mostram valores significativos da resistência à compressão das amostras ensaiadas (0.5 a 3.0MPa). Para a resistência à tracção, com valores igualmente expressivos, os resultados apontam aproximadamente para cerca de 20% da resistência à compressão respectiva [4, 5], valor que se enquadra bem na gama de valores correntes para blocos de alvenaria de outra tipologia (tijolo, cimento, etc.).

3. Ensaio sobre paredes de alvenaria em adobe

A fim de caracterizar o comportamento mecânico (rigidez, capacidade resistente, capacidade de dissipação de energia, mecanismo de colapso) das paredes de alvenaria de adobe existentes nas construções desta região em face de solicitações cíclicas (tais como

as induzidas por sismos), foram realizados ensaios cíclicos quase-estáticos e ensaios de caracterização dinâmica de paredes de uma casa situada em Paço, Aveiro.

3.1. Descrição da casa em estudo

Segundo informações recolhidas no local a casa em estudo teria entre 80 a 100 anos e situa-se numa zona rural. Com a fachada principal orientada a sul, compõe-se de um corpo rectangular principal de um piso térreo e por uma ampliação lateral de dois pisos junto da fachada principal (ver Figura 1). A tipologia construtiva da habitação baseava-se em paredes em alvenaria de adobe, pavimentos em madeira de pequeno vão (entre os 2 e os 4 metros) e cobertura com estrutura de suporte em madeira revestida a telha cerâmica. Foram observados sinais de intervenções feitas durante a vida útil da habitação, tais como a criação de novas paredes e recurso a argamassas de base cimentícia evidenciado pela heterogeneidade de materiais em algumas zonas.

Dado que a casa se encontrava abandonada, foi necessário proceder a trabalhos de limpeza e de demolição estratégica de alguns elementos, seguidos de um levantamento fotográfico para registar anomalias e fragilidades e de um registo geométrico para se definir a zona de ensaio (ver Figura 2).

A casa apresentava algumas anomalias estruturais típicas deste tipo de construções antigas: desagregação do adobe por acção de agentes climáticos, fissuração junto a cunhais (sinais de desligamento), na vizinhança de aberturas (concentração de tensão nos cantos) e ainda na zona de entrega deficiente das padieiras em madeira e fissuração localizada em zona de descarga e ligação dos barrotes de pavimento e cobertura.

3.2. Ensaio quase-estático para fora do plano da parede

Conforme referido no ponto anterior, e dado o estado de conservação da casa, procedeu-se previamente a trabalhos de limpeza e de demolição parcial. Foram removidos os pavimentos as coberturas, janelas e portas, para se realizarem os ensaios em segurança.

Antes da realização do ensaio foi feita a identificação das frequências próprias das principais paredes da casa em estudo para apoiar no futuro a calibração de modelos numéricos. Numa segunda fase, foi efectuado um ensaio destrutivo com imposição de forças horizontais cíclicas fora do plano, em paredes directamente opostas (Figura 3), utilizando um sistema de ensaio similar ao apresentado por Arêde *et al.* [6].

Foi então idealizado e montado um dispositivo para aplicar forças horizontais fora do plano por forma a permitir ciclos de carga-descarga com inversão do sinal de deslocamento (Figura 3-b). Este dispositivo consistiu simplesmente num tubo oco de alumínio, destinado a prevenir efeitos de 2ª ordem (encurvadura) do sistema de ensaio, ao qual foram ligados dois varões roscados do tipo Dywidag por aparafusamento e soldadura por forma a permitir a conexão às restantes peças do sistema que ligam às paredes. Numa das extremidades foi utilizada uma ligação rotulada, estando na outra extremidade uma ligação rígida realizada por aparafusamento à parede. A fim de permitir introduzir os deslocamentos pretendidos, foi adoptada uma montagem de porca e contra-porca na parede exterior (parede mais frágil que efectivamente se pretendeu ensaiar), respectivamente nas suas faces interior e exterior. Dado que a parede interior “de reacção” estava ligada ao sistema de ensaio reagindo apenas a esforços axiais, o aperto da porca do lado interior da parede exterior permitiu introduzir esforços de compressão no sistema de ensaio impondo assim abertura entre paredes; de igual forma o aperto da porca exterior conduziu a esforços de tracção no sistema, impondo então movimentos no sentido de fecho entre paredes.

De forma a permitir uma melhor distribuição das cargas, foram utilizadas pranchas de madeira no encosto do sistema de ensaio às paredes. Este sistema de ensaio baseia-se no apresentado por Costa *et al.* [7], tendo sido no entanto aqui utilizada uma actuação manual para introdução das cargas em vez de uma actuação hidráulica em virtude do reduzido valor previsto para as forças neste ensaio. Na Figura 4 é possível observar todo o sistema de ensaio utilizado, assim como os pormenores de ligação às paredes.

A carga foi aplicada centrada nas paredes a uma altura de 2,33 m desde a cota térrea, tendo sido medida com recurso a uma célula de carga do tipo TC4 da marca AEP-

Transducers, em simultâneo com o registo de deslocamentos através de transdutores de fio da marca Waycon fixos a estruturas externas de referência (simples andaimes). O sistema de aquisição consistiu num par de placas de aquisição NI-6210 e NI-6211 da National Instruments (NI) ligadas via USB a um computador portátil destinado a visualizar e registar as medidas dos transdutores através de um programa de aquisição e controlo desenvolvido no LESE (Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural da FEUP) com base na plataforma LabVIEW da NI.

3.3 Resultados

3.3.1 Resultados do ensaio experimental

Do ensaio experimental executado foram registados a evolução de deslocamentos em vários pontos da parede (ver Figura 3) de acordo com o nível de força imposto. Assim, tal como pode ser observado na Figura 5, obteve-se um gráfico representativo do comportamento cíclico da parede próximo do ponto de aplicação da carga, bem como o perfil de deslocamentos da parede em planta e em altura para pontos máximos de deslocamento. Entende-se como deslocamento positivo o movimento para o exterior da parede em análise.

Dos resultados experimentais obtidos, verificou-se que a parede se comportou de modo ligeiramente assimétrico condicionado principalmente pelo efeito da parede de retorno. A resistência máxima exibida foi de 6.8 kN no sentido de abertura e de 5 kN no sentido de fecho entre paredes, perdendo rapidamente resistência após esse nível de força. O comportamento pós-pico exibido é tipico de parede de alvenaria solicitada para fora do plano, governado pela instabilidade do bloco em estudo. A parede atingiu um *drift* máximo de 3,8%, tendo-se parado o ensaio devido ao estado de degradação da parede. Do perfil de deslocamento em planta pode ser confirmado o modo de rotura que foi observado no local, com o destacamento da parede do cunhal na parte direita, tendo este último um deslocamento superior à zona de aplicação da carga.

No entanto, e de forma a compreender melhor o comporamento exibido pela parede, foi efectuado um cálculo preliminar da resistência máxima esperada para este painel ensaiado. Com base na análise limite de equilíbrio, resultante do movimento de corpo rígido deste elemento, foi possível obter uma previsão de cerca de 3.3 kN, valor este bastante inferior ao obtido no ensaio experimental. A diferença entre estes dois valores poderá ser justificado parcialmente por alguma resistência à tracção exibida pelas juntas, aumentando assim a resistência ao mecanismo de derrube resultante da aplicação das forças, e também pelo efeito da parede de retorno do interior da casa com uma ligação de blocos bem emparelhada que contribuiu para o aumento da resistência à torção global e ao corte das juntas na ligação.

3.3.2 Fissuração e danos sobre a parede ensaiada

Relativamente aos efeitos e danos, foi observado o desenvolvimento da fissuração junto ao cunhal numa zona já com sinais de fragilização. A fissuração evoluiu de forma que as duas paredes ortogonais ficaram totalmente desligadas (devido à rotura de adobes causada pela acção crescente para fora do plano) desde o nível da cobertura até 25cm acima do terreno com um abertura de cerca de 2cm como se pode visualizar na Figura 6.

Durante o ensaio foi observada a criação de um mecanismo de flexão de charneira diagonal que levaria a parede a uma rotura por flexão para fora do seu plano, como se visualiza na Figura 7, que inclui também uma representação esquemática dessa forma de rotura.

4. Conclusões – comentários finais

Com o trabalho apresentado pretendeu-se apenas dar a conhecer os primeiros passos na avaliação do comportamento de estruturas de alvenaria de adobe sujeitas a acções horizontais. Este tipo de trabalho, se devidamente estendido a outros casos, permite caracterizar os modos de rotura das paredes para fora do plano, o comportamento histerético e o nível máximo admissível de deformação, podendo ainda potenciar formas indirectas de determinar o módulo de deformabilidade inicial das paredes.

O facto de se executar o ensaio na própria parede em estudo e não em modelos realizados em laboratório, permite avaliar e descrever com maior realismo o comportamento tendo em consideração as reais condições fronteira existentes (quer das ligações entre paredes, quer da eventual presença de coberturas) ou a influência das aberturas, das condições de fundação e de outros pontos singulares.
As condições cinemáticas da rotura verificada são muito dependentes das condições de ligação às paredes ortogonais e da presença de aberturas. Dos resultados experimentais estimou-se os valores máximos de *drift* de 0.4% até ao limite do regime elástico e de aproximadamente 4% para resistência última.
Os dados recolhidos deverão permitir caracterizar as construções existentes em adobe, interpretar as patologias estruturais mais comuns, calibrar modelos numéricos, avaliar a segurança e desenvolver soluções de reforço adequadas.

Bibliografia

- [1] VEIGA OLIVEIRA, E.; GALHANO, F. Arquitectura Tradicional Portuguesa. Portugal de Perto Publicações D. Quixote. Portugal. 1992.
- [2] Seminário. Arquitecturas de Terra. Museu Monográfico de Conímbriga. Ed CCRCentro. Portugal. 1992.
- [3] HERNANDEZ, R.S.; BARRIOS, M.S.; POZAS, J.M.M. Characterization of ancient construction materials (mud walls and adobe) in the Churches of Cisneros, Villada and Boada de Campos (Palencia). Materiales de Construcción Vol. 50. n.º 257. 2000. pp. 33-45.
- [4] VARUM, H.; MARTINS, T.; VELOSA, A. Caracterização do adobe em construções existentes na região de Aveiro. IV SIACOT Seminário Ibero-Americano de Construção com terra e III Seminário Arquitectura de Terra em Portugal. Convento da Orada, Monsaraz, 8 a 10 de Outubro de 2005.
- [5] VARUM, H.; COSTA, A; PEREIRA, H.; ALMEIDA, J. Ensaios de caracterização do comportamento estrutural de construções existentes em adobe. V SIACOT Seminário Ibero-Americano de Construção com terra e I Seminario Argentino de Arquitectura y Construccion con tierra, Mendoza, Argentina, 14 al 17 de junio de 2006.
- [6] ARÊDE, A.; COSTA, A.; COSTA, A. A.; OLIVEIRA, C.S.; NEVES, F. Caracterização Experimental do Sistema Construtivo do Grupo Central do Arquipélago Açoreano – Uma Contribuição para a Avaliação e Redução da sua Vulnerabilidade Sísmica, *SÍSMICA 2007 – 7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica*, FEUP, Porto, 2007.
- [7] COSTA, A. A.; COSTA, A.; ARÊDE, A.; OLIVEIRA, C. S.; NEVES, F. "Metodologia da preparação de ensaios a realizar na ilha do Faial, Açores, SÍSMICA 2007 – 7º Congresso de Sismologia e Engenharia Sísmica, FEUP, Porto, 2007.

Autores

Aníbal Costa – Professor Catedrático, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Portugal

Humberto Varum – Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Portugal

Henrique Pereira – Aluno de Mestrado, Bolseiro de Investigação, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Portugal

Hugo Rodrigues – Aluno de Doutoramento, Bolseiro de Investigação, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Portugal

Romeu Vicente – Assistente, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Portugal

António Arêde – Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal

Alexandre A. Costa – Aluno de Doutoramento, Bolseiro de Investigação, Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO FORA DO PLANO DE PAREDES DE ALVENARIA DE ADOBE

Aníbal Costa, Humberto Varum, Henrique Pereira, Hugo Rodrigues, Romeu Vicente, António Arêde e Alexandre A. Costa

Figuras

Figura 1 – Casa em alvenaria de adobe

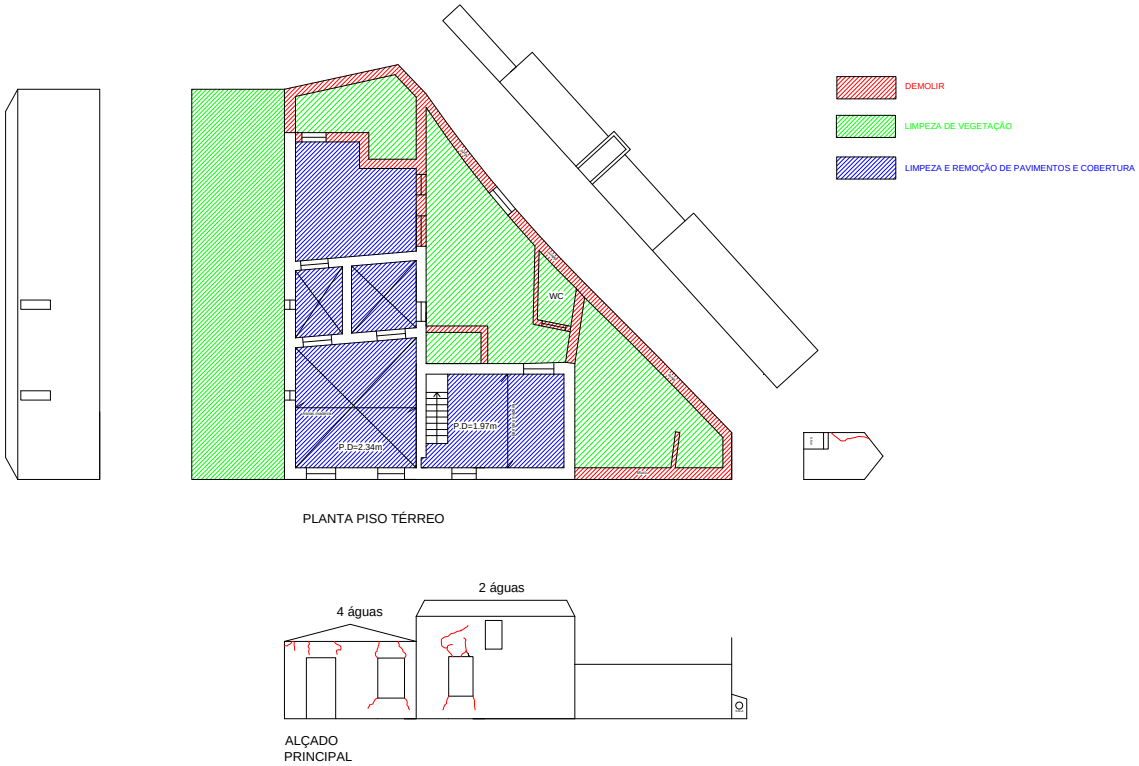


Figura 2 – Registo geométrico da habitação e levantamento de fissuração importante

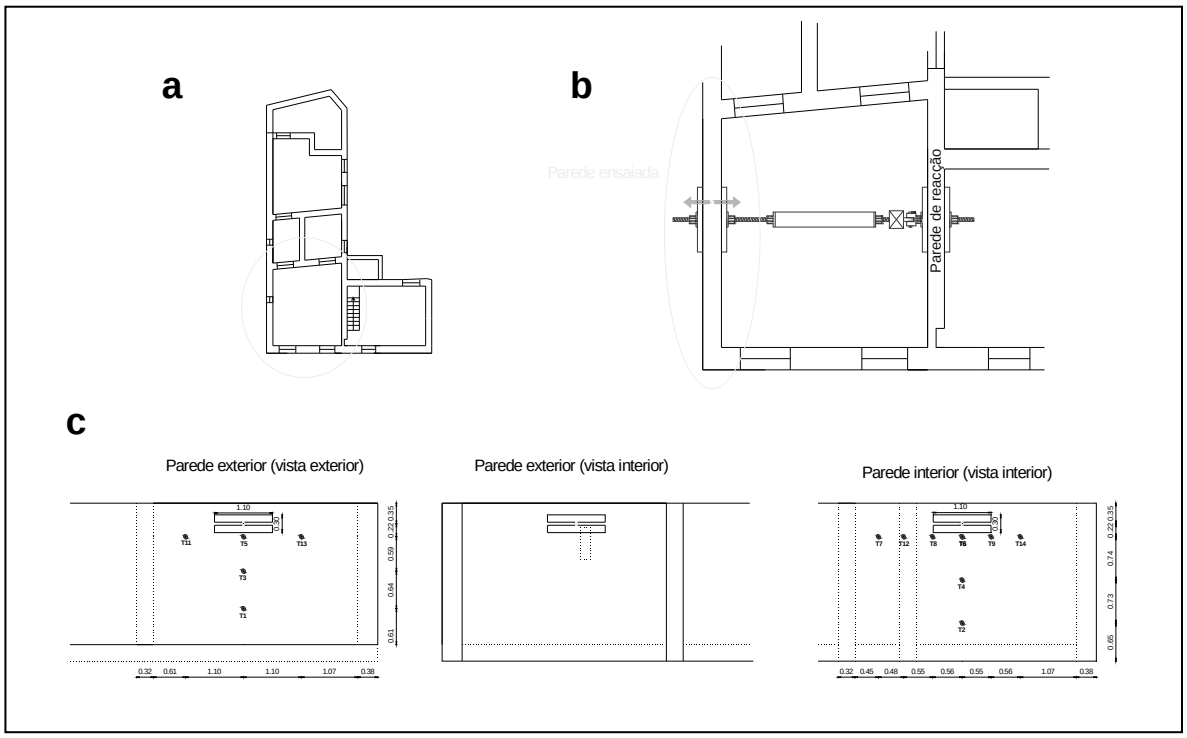


Figura 3 – Esquema geral do dispositivo de ensaio: a) planta geral, b) detalhe da parede ensaiada, c) pontos de medida de deslocamentos normais às paredes.

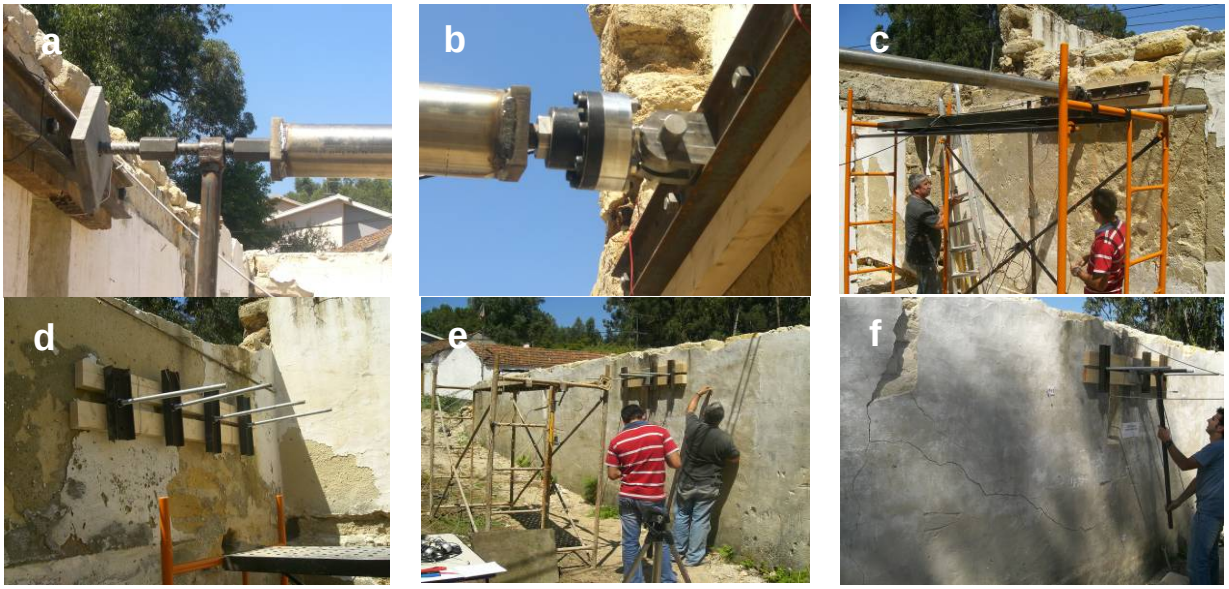
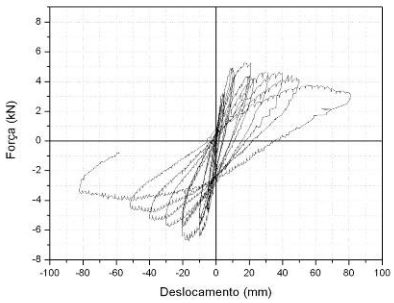
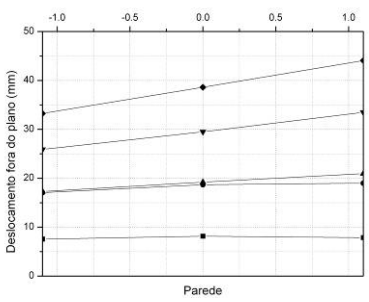


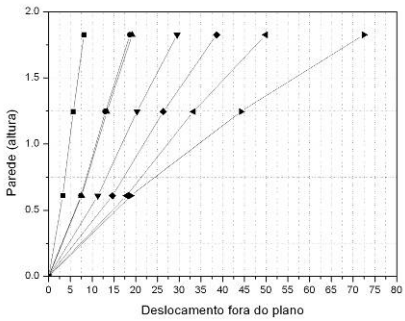
Figura 4 – Pormenores do dispositivo de ensaio: a) ligação na extremidade activa, b) célula de carga na ligação rotulada à extremidade passiva, c) estruturas de referência para transdutores de fio na parede interior, d) amarração de pranchas de madeira, e) fixação de transdutores de fio na face exterior da parede exterior e, f) operação de aperto par movimento de fecho entre paredes



Comportamento cíclico



Perfil de deslocamentos em planta (vista exterior)



Perfil de deslocamentos em altura

Figura 5 – Resultados do ensaio experimental

Figura 6 – Evolução do desligamento na zona de cunhal

Figura 7 – Mecanismo de rotura parcial para fora do plano