

CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E REFORÇO DE CONSTRUÇÕES EM ALVENARIA DE ADOBE

HUMBERTO VARUM

Universidade de Aveiro
Portugal

ANÍBAL COSTA

Universidade de Aveiro
Portugal

DORA SILVEIRA

Universidade de Aveiro
Portugal

CRISTINA OLIVEIRA

Universidade de Aveiro
Portugal

ANTÓNIO FIGUEIREDO

Universidade de Aveiro
Portugal

SUMÁRIO

O adobe é um dos materiais de construção tradicionais mais disseminados, sendo empregue com abundância em várias zonas do mundo. Estima-se que cerca de 30% da população mundial vive em edifícios de terra [1], grande parte dos quais em adobe.

Em Portugal, especialmente na Beira Litoral, o adobe foi muito utilizado na construção até meados do século XX. Este material aparece em edifícios rurais e urbanos, muitos dos quais continuam, hoje em dia, habitados. Estima-se que na cidade de Aveiro 25% dos edifícios são de adobe e que, considerando todo o distrito, este número atinge os 40%. Vários dos edifícios urbanos têm associado um importante valor arquitectónico, patrimonial e histórico, destacando-se os de estilo Arte Nova.

A terra é um material barato, reutilizável, disponível nas proximidades das obras, e está associada a métodos construtivos simples que exigem um reduzido consumo de energia. Este material tem, por isso, sido votado a um interesse crescente nos últimos anos. No entanto, a construção em adobe, se não for devidamente concebida e reforçada, poderá apresentar uma resposta deficiente quando sujeita a acções horizontais cíclicas, como as induzidas por sismos, sofrendo danos estruturais severos e atingindo até, frequentemente, o colapso.

Neste trabalho serão apresentados resultados de investigação recente desenvolvida na Universidade de Aveiro no domínio da caracterização mecânica de blocos de adobe e de ensaios de avaliação do comportamento estrutural de paredes de alvenaria de adobe sujeitas a acções horizontais cíclicas. Também são apresentados os resultados de ensaios de soluções de reforço.

1. INSTRUÇÕES GERAIS

A construção em terra tem sido largamente utilizada ao longo da história devido às qualidades que apresenta, quer na facilidade de edificação, quer no conforto interior. É estimado que cerca de 30% da população mundial vive em edifícios de terra, e que cerca de 50% da população dos países em desenvolvimento, incluindo a maioria da população rural e pelo menos 20% da população urbana e urbana marginal, vive em edifícios de terra [1]. A construção em terra também apresenta uma expressão importante nos países desenvolvidos. Na França, por exemplo, cerca de 15% da população vive em edifícios deste tipo [2].

A terra é um material de construção que apresenta muitas características atractivas: é barata, disponível localmente, reciclável, apresenta boas propriedades térmicas e acústicas, e encontra-se associada a métodos construtivos simples que requerem apenas um pequeno consumo de energia. No entanto, a construção em terra e, em particular, a construção em adobe, se não for efectivamente reforçada, pode apresentar um comportamento deficiente quando sujeita a acções horizontais. Vários sismos recentes que afectaram a construção em terra evidenciam a vulnerabilidade sísmica associada a este tipo de construção quando não é devidamente reforçada [3, 4, 5].

Têm sido realizados alguns trabalhos de investigação para a caracterização dinâmica das construções em adobe e na procura de soluções de reforço adequadas para edifícios em terra, nomeadamente no Peru [6], país com importante tradição de construção com terra e, simultaneamente, com grande perigosidade sísmica. Apesar do

trabalho já desenvolvido e da informação daí resultante, reconhece-se que existem ainda muitas questões por resolver e lacunas no conhecimento do comportamento deste tipo de construções. É assim evidente a necessidade de prosseguir com mais investigação.

2. CONSTRUÇÃO EM ADOBE EM PORTUGAL

Num passado recente, a terra foi um material de construção muito utilizado em Portugal, tendo sido aplicada principalmente no Algarve, Alentejo e Beira Litoral, até meados do século XX. O adobe, em particular, adquiriu um nível quase industrial a norte do rio Mondego, principalmente no distrito de Aveiro, envolvendo fornecedores de terra, de cal, produtores de adobe, e empreiteiros de construção, sendo exemplo deste desenvolvimento o areeiro de Esgueira, que fornecia ao mercado vários tipos de adobe [7]. O sucesso do adobe nesta região ficou a dever-se sobretudo às características das matérias-primas existentes, sendo os blocos geralmente constituídos por uma areia grosseira ou terra argilosa misturada com cal. Em meados do século XX, as estruturas em alvenaria de adobe passaram a ser combinadas com elementos em betão armado, até serem rápida e definitivamente abandonadas [8].

Presentemente, de acordo com informação da Câmara Municipal, cerca de 25% dos edifícios existentes na cidade de Aveiro são de adobe, e estima-se que esta percentagem sobe para 40% quando nos referimos a todo o distrito. A importante expressividade deste sistema construtivo tem sido confirmada em levantamentos de edificado realizados recentemente [9, 10]. O adobe pode ser encontrado em vários tipos de construção: edifícios rurais e urbanos, muitos dos quais são ainda habitados, muros, poços de água, igrejas e armazéns (Figura 1). Vários dos edifícios urbanos em adobe têm associado um importante valor arquitectónico, cultural e histórico, destacando-se os de estilo Arte Nova. Na cidade de Aveiro, o antigo edifício dos bombeiros, o edifício da Fábrica Centro Ciência Viva, e o edifício da Guarda Nacional Republicana, entre muitos outros, são bons exemplos de edifícios em adobe com importante valor sociocultural.



Figura 1: Exemplos de construções em adobe existentes no distrito de Aveiro

O processo de construção com adobe no distrito de Aveiro era baseado na experiência acumulada, transmitida de geração em geração, sem haver uma preocupação com a segurança sísmica, nem outros cuidados associados a exigências funcionais e de conforto compatíveis com as exigências actuais. A reabilitação e o reforço das construções em adobe existentes têm também sido negligenciados nas últimas décadas. Assim, este vasto parque

construído não se encontra adequadamente reforçado para resistir à acção sísmica, nem devidamente conservado e adaptado às actuais exigências, sofrendo de anomalias estruturais e não estruturais de vários tipos. É portanto urgente procurar atingir um nível de conhecimento profundo acerca do parque construído em adobe no distrito de Aveiro, nomeadamente no que diz respeito à sua constituição, sistemas estruturais, vulnerabilidade e fragilidades estruturais, patologias e estado de conservação, com o principal objectivo de promover a sua reabilitação e reforço, e assim contribuir para a melhoria da qualidade de vida daqueles que utilizam estas construções, para um aumento dos níveis de segurança associados, e para a preservação de uma importante herança cultural e patrimonial.

3. CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA DE BLOCOS DE ADOBE

Foi seleccionado um conjunto de blocos de adobe representativos das diferentes tipologias existentes na região de Aveiro, tendo sido recolhidos de 8 muros e 8 casas, em locais distintos. Destes blocos foram extraídos provetes cilíndricos com diâmetro compreendido entre 60 e 95mm, e altura igual ao dobro do diâmetro. Um total de 101 provetes, 51 procedentes de casas e 50 de muros, foi submetido a ensaios mecânicos: 83 à compressão simples e 18 à compressão diametral (Figura 2).



Figura 2: Ensaios à compressão simples e à compressão diametral sobre provetes de adobe

Os valores médios de resistência à compressão simples, obtidos por construção, variam entre 0,53MPa e 1,72MPa. Os valores obtidos para a resistência à tracção correspondem a aproximadamente 20% dos valores de resistência à compressão respectiva. O módulo de elasticidade médio, calculado por construção, assume valores entre 51MPa e 448MPa. Os resultados médios obtidos por construção são apresentados na Tabela 1.

Os ensaios realizados apresentam uma grande variabilidade de resultados. Para os ensaios de provetes de muros esta variabilidade é, de uma maneira geral, superior à dos ensaios de provetes de casas.

No que diz respeito à granulometria dos adobes estudados, verifica-se uma clara tendência para que as amostras com maiores fracções de partículas de menores dimensões apresentem valores de resistência à compressão e tracção superiores.

Uma descrição detalhada dos procedimentos e dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização mecânica dos blocos de adobe pode ser encontrada em [11].

Tabela 1 - Resultados dos ensaios sobre provetes de adobe, por construção.

		Módulo de elasticidade (MPa)	Resistência à compressão (MPa)	Resistência à tracção (MPa)	
Muros	W_01	138	0,75	--	
	W_02	117	0,67	0.13	
	W_04	200	0,80	0.12	
	W_05	340	1,39	0.40	
	W_06	209	1,02	--	
	W_07	94	0,64	--	
	W_09	114	0,85	--	
	W_10	127	0,77	--	
	Casas	H_01	273	1,00	0.13
		H_02	203	0,81	0.19
H_03		97	0,61	0.19	
H_04		51	0,53	--	
H_05		448	1,72	--	
H_09		87	0,55	--	
H_10		334	1,57	--	
H_11		143	0,85	--	

4. COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA ALVENARIA DE ADOBE – ENSAIOS EXPERIMENTAIS

O Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro tem vindo a desenvolver ensaios experimentais em estruturas de adobe com o objectivo de avaliar o seu comportamento estrutural [12, 13, 14, 15, 16,17, 18]. Relativamente à acção sísmica, estes ensaios têm permitido reunir um conjunto relevante de recomendações para o reforço e reabilitação de estruturas de adobe.

Com vista a caracterizar o comportamento estrutural de construções já edificadas, têm sido realizadas campanhas experimentais *in situ*. Referem-se como exemplos a Parede de Fermelã (Figura 3) e a Casa do Paço (Figura 4), ambas na região de Aveiro [12]. Estes dois casos correspondem a situações em que a estrutura iria ser demolida. Com os ensaios realizados *in situ*, conseguiu-se avaliar o funcionamento global da estrutura com descrição completa do comportamento dos diferentes elementos estruturais e ligações entre eles.



Figura 3: Parede de Fermelã



Figura 4: Casa do Paço

O Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro tem também realizado ensaios experimentais em laboratório. Na Figura 5 apresenta-se uma parede de adobe com geometria em planta em forma de *I*, construída à escala real, com dimensões finais de 3,07m de altura, 3,5 m de comprimento e 0,29m de espessura média. Para simular uma edificação representativa do património existente no distrito de Aveiro, foram utilizados blocos de adobe retirados de uma demolição na região e utilizaram-se técnicas e materiais tradicionais.



Figura 5: Construção da parede de adobe (aplicação do reboco)

O esquema de ensaios realizado foi semelhante ao utilizado para os ensaios *in situ*, com a condução de ensaios dinâmicos de caracterização do comportamento da parede e, em seguida, a aplicação de forças horizontais cíclicas de amplitude crescente. Além do estudo do comportamento estrutural da parede, foi também considerada e analisada uma solução de reparação e reforço.

Durante a construção da parede apenas materiais tradicionais foram utilizados, pois um dos objectivos era representar adequadamente os edifícios tradicionais de adobe existentes. Assim, a solução de reparação deveria considerar componentes com uma boa compatibilidade com estes materiais. Adicionalmente, era desejável que a solução de reparação fosse de baixo custo.

Consideraram-se três diferentes composições da argamassa a utilizar na selagem das fissuras: cal aérea, cal hidráulica e uma mistura de ambas em igual proporção. Além da selagem das fendas, a solução deveria também incluir uma malha sintética aplicada em toda a envolvente da parede para o seu reforço. Para avaliar a eficiência da solução de reparação e reforço, foram conduzidos testes à argamassa e malha sintética. A resistência das argamassas foi testada através de ensaios a blocos de adobe, sem fissuras e com as fissuras preenchidas com as diferentes soluções. A solução à base de cal hidráulica permitiu uma ligação muito mais eficiente, quando comparada com as outras duas soluções, tendo sido a composição escolhida para preencher as fissuras da parede. Para estimar a influência da malha no reforço da laje quando incorporada no reboco, o seu comportamento à tracção foi avaliado experimentalmente.

Os danos da parede foram então reparados através do preenchimento das fissuras, com a injeção da argamassa de cal hidráulica sob pressão. Depois, o reboco original foi retirado para se poder fixar a malha sintética e aplicou-se novo reboco (Figura 6).

A parede reforçada foi ensaiada repetindo-se o mesmo esquema de ensaios da parede original, com ensaios dinâmicos e ensaios cíclicos com imposição de forças horizontais de amplitude crescente. A Figura 7 apresenta o estado final de uma das fachadas da parede.



Figura 6: Aplicação da malha sintética



Figura 7: Estado final de danos

A comparação entre os resultados obtidos para a parede não reforçada e para a parede reforçada, em termos de tensão versus drift, é apresentada na Figura 8.

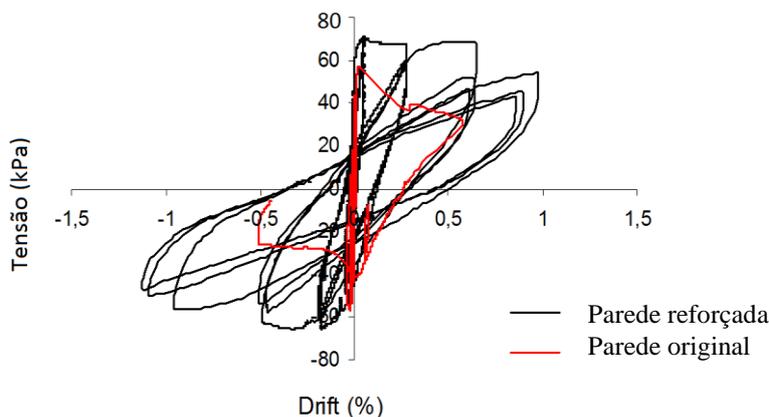


Figura 8: Tensão vs. drift: comparação entre parede original e reforçada

A máxima capacidade ao corte registada no teste cíclico da parede original foi de 60kPa para um drift de 0,05% no topo da parede. O drift lateral máximo observado foi de 0,61%. Com a solução de reforço apresentada, a máxima capacidade de corte aumentou para 67kPa e o máximo drift imposto foi de 1,6%, ou seja, a capacidade de corte aumentou aproximadamente 10% e o deslocamento máximo foi mais do dobro do aplicado na parede original. Relativamente à resistência residual no final dos ensaios, na parede original registou-se o valor de 35kPa e na parede reforçada 45kPa.

A análise da redução de resistência após o pico, para a parede original e parede reforçada, revela que a fragilidade observada na parede original foi reduzida de forma significativa com a solução de reforço adoptada, aumentando a sua ductilidade e a capacidade de dissipar energia.

A Figura 8 permite verificar que a reabilitação da parede possibilitou recuperar uma rigidez inicial próxima da parede original não reforçada. A frequência inicial de ambas as paredes, original e reforçada, foi de valor idêntico: 23Hz. A evolução da primeira frequência natural é apresentada na Figura 9 em função do drift máximo imposto. Uma vez que a redução da rigidez durante os ensaios da parede reforçada é mais suave, a primeira frequência natural desta parede terá também um decréscimo menos abrupto, reforçando o que já foi dito atrás.

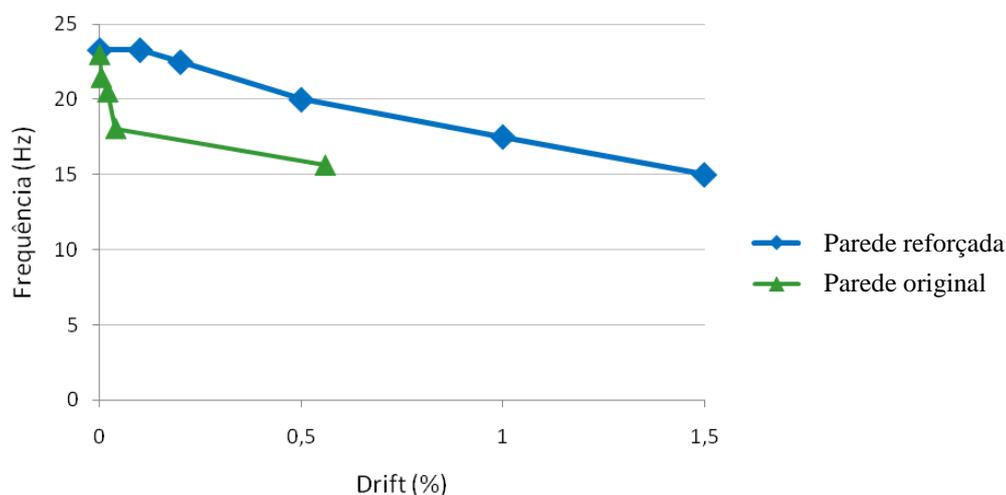


Figura 9: Evolução da primeira frequência natural nas paredes original e reforçada

A solução de reforço utilizada permitiu a melhoria do desempenho da parede reduzindo a sua vulnerabilidade sísmica. Não se observou qualquer rotura frágil, tão característica deste tipo de alvenaria, na parede após o reforço. A capacidade resistente lateral aumentou e registaram-se melhorias significativas na ductilidade e na capacidade de dissipação de energia.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As construções de adobe apresentam fragilidades importantes no que concerne a acção sísmica. Uma parte importante do vasto parque edificado na região de Aveiro não apresenta características adequadas para suportar acções horizontais, como as induzidas por sismos, nem se encontra devidamente conservado e adaptado às actuais exigências funcionais e de conforto, sofrendo de anomalias estruturais e não estruturais de vários tipos.

O Departamento de Engenharia de Civil da Universidade de Aveiro tem vindo a desenvolver investigação através da realização de ensaios de caracterização mecânica dos adobes existentes na região e ensaios do comportamento estrutural de construções em adobe, *in situ* e em laboratório, com o objectivo de avaliar a vulnerabilidade sísmica destas estruturas e estudar soluções de reforço. Algum do trabalho desenvolvido foi apresentado neste artigo.

A investigação desenvolvida permite dispor de mais conhecimento para interpretação das patologias estruturais características destas estruturas, possibilitando análises mais rigorosas da segurança de estruturas de adobe. Esta informação poderá estabelecer as bases para o desenvolvimento e calibração de modelos numéricos. O estudo de soluções de reforço permite ainda a possibilidade de corrigir as deficiências que estas estruturas apresentam face a forças horizontais cíclicas, como as induzidas pela acção sísmica. A solução de reforço analisada demonstrou ser viável, adequada e com ganhos estruturais significativos, permitindo a redução da vulnerabilidade sísmica.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a todos os que contribuíram para a realização do estudo aqui apresentado, com uma menção especial a:

- Laboratory of Earthquake and Structural Engineering (LESE), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Empresa STAP
- Câmara Municipal de Aveiro
- Departamentos de Física, Mecânica e Geociências da Universidade de Aveiro

7. REFERÊNCIAS

- [1] Houben, H., Guillaud, H. (1994) *Earth Construction - A Comprehensive Guide*. ITDG Publishing, Londres, Reino Unido.
- [2] North, G., Kanuka-Fuchs, R., *Waitakere City's Sustainable Home Guidelines - Earth building*. (<http://www.waitakere.govt.nz/abt/cit/ec/bldsus/pdf/materials/earthbuilding.pdf>)
- [3] Webster, F., Tolles, E. (2000) Earthquake damage to historic and older adobe buildings during the 1994 Northridge, California Earthquake. *Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering*. Auckland, Nova Zelândia. 30 de Janeiro a 4 de Fevereiro, 2000.
- [4] Ocola, L., Huaco, P. (2005) Respuesta sísmica de edificaciones de adobe en el territorio peruano: terremotos 1974-2001. *Proceedings of the SismoAdobe2005 Conference* (publicação em CD), Lima, Peru, 16 a 19 de Maio, 2005.
- [5] Langenbach, R. (2005) Collapse from the inside-out. The impact of the 2003 Bam, Iran earthquake on the earthen architecture of the Arg-e Bam. *Proceedings of the SismoAdobe2005 Conference* (publicação em CD), Lima, Peru, 16 a 19 de Maio, 2005.
- [6] Blondet, M., Torrelva, D., Villa Garcia, G. (2002) Adobe in Peru: Tradition, Research and Future. *Proceedings of Modern Earth Building 2002 -International Conference and Fair*, Berlin, Germany.
- [7] Santiago, L. (2005) O areeiro de Manuel Duarte – Esgueira, Aveiro. *Arquitectura de terra em Portugal*, Argumentum, Lisboa, Portugal.
- [8] Castro, A. (2009) O sistema construtivo tradicional em período de transição de linguagens de arquitectura. O Movimento Moderno e o adobe. *Tese de Mestrado*. Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal.
- [9] Silva, S., Varum, H., Bastos, D., Silveira, D. (2010) Arquitectura de terra – investigação e caracterização de edificações em adobe no concelho da Murtosa. *Terra em Seminário 2010*. Argumentum, Lisboa, Portugal.
- [10] Silveira, D., Varum, H., Costa, A., Lima, E. (2010) Levantamento e caracterização do parque edificado em adobe na cidade de Aveiro. *Actas do 6º Seminário de Arquitectura de Terra em Portugal e 9º Seminário Ibero-Americano de Construção e Arquitectura com Terra* (publicação em CD), Coimbra, Portugal, 20 a 23 de Fevereiro de 2010.
- [11] Varum, H., Costa, A., Martins, T., Pereira, H., Almeida, J., Silveira, D. (2007) Experimental Characterization of the Mechanical Behaviour of Adobe Bricks of Existing Constructions in Aveiro District. *Proceedings of the 13th Conference of Sociedade Portuguesa de Materiais and IV International Materials Symposium – A Materials Science Forum*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal. 2007.
- [12] Arêde, A., Costa, A., Varum, H., Vicente, R., Costa, A., Pereira, H., Rodrigues, H. (2007) Avaliação experimental do comportamento fora do plano de paredes de alvenaria de adobe. *Actas do V Seminário Arquitectura de Terra em Portugal*, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Aveiro
- [13] Figueiredo, A. (2009) Caracterização de uma solução de reforço sísmico de paredes de adobe. *Tese de Mestrado*, Universidade de Aveiro, Aveiro
- [14] Pereira, H. (2008) Caracterização do comportamento estrutural de construções em adobe. *Tese de Mestrado*, Universidade de Aveiro, Aveiro
- [15] Silveira, D., Varum, H. e Costa, A. (2007) Rehabilitation of an important cultural and architectural heritage: the traditional adobe constructions in Aveiro district. *Sustainable Development III*. WITPress, Vol.s 1 and 2, pp. 705-714, Carvoeiro, Algarve, Abril de 2007.
- [16] Varum, H., Martins, T., Velosa, A. (2005) Caracterização do adobe em construções existentes na região de Aveiro. *Actas do IV SIACOT Seminário Ibero-Americano de Construção com terra e III Seminário Arquitectura de Terra em Portugal*. Convento da Orada. Monsaraz, Portugal
- [17] Varum, H., Costa, A., Silveira, D., Pereira, H., Almeida, J., Martins, T. (2007). Structural Behaviour Assessment and Material Characterization of Traditional Adobe Constructions, *Proceedings of AdobeUSA 2007*, May 18-20, NNMC and Adobe Association of the Southwest, El Rito, NM, USA
- [18] Varum, H., Costa, A., Pereira, H., Almeida, J., Rodrigues, H. (2008) Caracterização do comportamento estrutural de paredes de alvenaria de adobe. *Revista Mecânica Experimental*, APAET, Volume 15, pp. 23-32.