

CARACTERIZAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO DIFERIDO DE ALVENARIA DE ADOBE

Daniel Oliveira⁽¹⁾, Humberto Varum⁽²⁾, Rui Silva⁽¹⁾, *, Henrique Pereira⁽²⁾, Paulo Lourenço⁽¹⁾ e Aníbal Costa⁽²⁾

(1) Departamento de Engenharia Civil – Universidade do Minho, Guimarães, Portugal
Tel.: +351 253 510 200; Fax: +351 253 510217; Email: danvco@civil.uminho.pt

(2) Departamento Engenharia Civil – Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal
Tel.: +351 234 370 049; Fax: +351 234 370 094; Email: hvarum@ua.pt

Tema 2: Materiais e comportamento

Palavras-chave: Alvenaria, Adobe, Fluência

Resumo

Este trabalho aborda o comportamento diferido da alvenaria de adobe, fenómeno que tem estado associado ao colapso de algumas construções de alvenaria de grande valor patrimonial e provavelmente estará associado ao dano que alguns edifícios de alvenaria de adobe, com valor histórico e patrimonial, apresentam.

A caracterização experimental deste fenómeno focou-se na situação concreta da construção em alvenaria de adobe da zona de Aveiro, tendo sido realizados ensaios de caracterização mecânica em provetes de blocos de adobe recolhidos de uma construção existente. Os resultados experimentais apresentados evidenciam a influência do processo manual de fabrico dos blocos e dos prismas, associado à utilização de materiais naturais, na variabilidade dos parâmetros materiais caracterizados.

Para a caracterização do comportamento diferido deste tipo de alvenaria, realizaram-se ensaios de pseudo-fluência, verificando-se que a deformação por fluência intensifica-se com o nível crescente de tensão de compressão a que os prismas são sujeitos e que a fendilhação é apenas visível para níveis de tensão próximos da tensão resistente. Contrariamente ao que geralmente acontece com prismas de alvenaria de tijolo sujeitos a carregamentos diferidos sob tensão constante, descrito na bibliografia de referência, a rotura destes prismas não ocorreu de forma explosiva, mas sim de uma forma suave e com grandes deformações. Contudo, a validação deste aspecto requer a realização de mais ensaios experimentais.

1. Introdução

O fenómeno de fluência em estruturas de alvenaria tem sido um problema pouco estudado, no entanto tem estado associado ao colapso de algumas construções de considerável valor patrimonial, nomeadamente o colapso da Torre Cívica de Pavia em Itália em 1989 (Valluzzi et al, 2005; Ferreti et al, 2006; Ignoul et al, 2006), o colapso da torre sineira de St. Madalena em Goch na Alemanha em 1993 (Pina-Henriques, 2005) e o colapso da nave central e parte da cúpula da catedral de Noto em Itália em 1996 (Binda et al, 2001). Estes colapsos foram caracterizados como repentinos e explosivos, sem que a estrutura de alvenaria apresentasse sinais aparentes que permitissem prever a sua ocorrência. Perante estes acontecimentos dramáticos, o interesse dos investigadores sobre os efeitos diferidos em alvenaria cresceu consideravelmente, tanto a nível experimental como a nível numérico (Pina-Henriques, 2005), de forma a prever o seu comportamento e desenvolver técnicas de reforço adequadas.

A fluência é um comportamento evidenciado por quase todos os materiais, consistindo na deformação diferida de elementos sujeitos a cargas constantes. Normalmente este fenómeno apenas tem relevância para cargas elevadas. No caso da alvenaria, considera-se que este fenómeno pode iniciar-se para elementos sujeitos a um estado de compressão cerca de 40% a 50% da tensão resistente à compressão (Pina-Henriques, 2005; Ferreti et al, 2006).

Tradicionalmente a fluência é caracterizada por três fases, o que também se verifica em estruturas de alvenaria. Uma primeira fase é caracterizada por uma diminuição gradual da velocidade de deformação devido à fluência, uma segunda fase em que a velocidade de deformação devido à fluência mantém-se constante e uma terceira fase em que há um aumento exponencial da velocidade de deformação até à rotura. Para que as duas últimas fases ocorram é necessário aplicar um elevado nível de tensão.

Tipicamente, para o estudo experimental sobre fluência em alvenaria antiga são realizados dois tipos de ensaios: ensaios de fluência acelerada ou pseudo-fluência (“*short-term creep*”) e ensaios de fluência a longo prazo (“*long-term creep*”). Basicamente, a diferença reside na duração, onde com os ensaios de pseudo-fluência pretende-se estudar o comportamento diferido da alvenaria de forma acelerada, em apenas alguns dias, enquanto que os ensaios de fluência a longo prazo duram geralmente anos.

Muitas das construções existentes em alvenaria de adobe no distrito de Aveiro são edifícios rurais e de pequeno porte, para os quais não existe grande risco associado ao estado de tensão vertical (rotura por compressão), e para os quais os efeitos diferidos nas paredes de alvenaria para o respectivo estado de compressão não são relevantes, pois estes edifícios são constituídos geralmente por um único piso não estando sujeitos a grandes tensões de compressão.

No entanto, existem ainda muitos edifícios em alvenaria de adobe de maior porte, geralmente em meio urbano, com um importante valor histórico e patrimonial associado, e que interessa estudar para garantir a sua preservação, como são exemplo alguns edifícios de estilo *Art Nouveaux*, igrejas, instalações industriais, entre outros (ver Figura 1). Nestes casos, o valor médio da tensão vertical de compressão instalada poderá atingir valores significativos (0.3 a 0.5 N/mm², cerca de 25% a 50% do valor da resistência média à compressão da alvenaria), sobretudo ao nível dos pisos térreos e das fundações, que em alguns casos também são de alvenaria de adobe, podendo assim ocorrer danos devido aos fenómenos de fluência.

Neste contexto, pretende-se caracterizar experimentalmente o comportamento da alvenaria de adobe à fluência. Os ensaios aqui apresentados foram realizados em prismas de alvenaria de adobe representativa da zona de Aveiro. Este estudo encontra-se ainda na sua fase inicial, pelo que neste artigo serão apresentados os resultados experimentais associados à caracterização material dos componentes da alvenaria e aos ensaios de pseudo-fluência.

2. Caracterização experimental dos materiais

Adobe

A fim de caracterizar experimentalmente os materiais constituintes da alvenaria de adobe, foram realizados ensaios de compressão uniaxial em provetes de adobe cilíndricos, obtidos de uma construção parcialmente demolida, situada em Fermelã Aveiro, aqui designada por casa *H_12*.

Os blocos de adobe recolhidos foram seleccionados aleatoriamente, evitando-se blocos não inteiros e blocos com danos significativos. Assim, foram retirados destes blocos, por corte rotativo, oito provetes cilíndricos, com diâmetro compreendido entre 78 e 90mm e com altura aproximadamente igual ao dobro do diâmetro. Os provetes de adobe foram numerados e seriados, de acordo com a seguinte notação: *H_12_i*, onde o índice *i* representa o número de ordem do provete extraído. Após extracção dos provetes procedeu-se à regularização das suas faces de topo, de forma a estas ficarem perfeitamente perpendiculares ao seu eixo. Na Tabela 1 apresentam-se os valores do módulo de elasticidade (E_a), resistência à compressão (f_{ca}) e extensão associada à

carga de pico (ϵ_{ult}) para cada um dos provetes, bem como o seu valor médio e coeficiente de variação.

Para os oito provetes cilíndricos ensaiados à compressão uniaxial obtiveram-se valores de resistência à compressão que variam entre 0.87 e 1.31 N/mm², cujo valor médio é de 1.13 N/mm² e um valor médio do módulo de elasticidade à compressão de 197.5 N/mm². A variação do módulo de elasticidade à compressão é considerável, apresentando um valor de 67%, em que o valor máximo obtido é 6.25 superior ao mínimo, demonstrando uma importante dispersão deste parâmetro. Esta dispersão poderá ser atribuída ao facto de serem materiais fabricados de forma manual, o que conduz, basicamente, a que todos os blocos sejam realizados de forma diferente, nomeadamente nas condições de compactação. Por seu lado, a variação da resistência à compressão é relativamente baixa, com um coeficiente de variação de 15%.

Tabela 1 – Resultados dos ensaios de caracterização mecânica dos blocos de adobe.

Provete	E_a (N/mm ²)	f_{ca} (N/mm ²)	ϵ_{ult} (mm/mm)
H_12_01	80	0.90	0.022
H_12_02	500	1.12	0.010
H_12_03	230	1.31	0.014
H_12_04	120	0.87	0.016
H_12_05	220	1.24	0.010
H_12_06	160	1.29	0.016
H_12_07	120	1.21	0.014
H_12_08	150	1.08	0.013
Média	197.5	1.13	0.014
CV (%)	67	15	27

Argamassa

Tendo em consideração as composições das argamassas encontradas na zona onde se recolheram os blocos de adobe e o objectivo de se obter uma argamassa representativa, adoptou-se a seguinte composição, em termos de volume aparente, 1:1:2 para cal hidratada, terra (terra da zona com alguma argila) e areia, respectivamente. Relativamente à quantidade de água, foi adicionada a quantidade necessária até que a argamassa tivesse a trabalhabilidade desejada, estando de acordo com o procedimento de amassadura que era habitualmente realizado em obra.

De forma a caracterizar a sua resistência à compressão, foram realizados ensaios de compressão uniaxial em 9 provetes cúbicos com as dimensões de 50×50×50 mm³, executados com a argamassa utilizada na construção dos prismas de adobe, a descrever adiante. Os provetes de argamassa foram ensaiados em compressão monotónica, aos 100 dias, com controlo de deslocamento e para uma velocidade de deformação de 2 µm/s. Na Tabela 2 é apresentada a resistência à compressão de cada provete (f_{cm}), bem como o valor médio e coeficiente de variação.

O valor médio da resistência à compressão obtido foi de 1.02 N/mm². No entanto a resistência uniaxial é inferior, devido ao efeito de confinamento do equipamento de ensaio e à geometria cúbica utilizada. De acordo com Neville (1995), após correcção do efeito de confinamento, será de esperar uma resistência à compressão uniaxial de 0.88 N/mm², o que representa um valor aceitável para argamassas utilizadas neste tipo de alvenaria. De referir que a resistência à compressão da argamassa apresenta uma variabilidade bastante baixa.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de caracterização mecânica da argamassa.

Provete	f_{cm} (N/mm ²)
CMC1	0.95
CMC2	0.92
CMC3	1.04
CMC4	1.07
CMC5	1.03
CMC6	1.06
CMC7	1.07
CMC8	1.08
CMC9	1.00
Média	1.02
CV (%)	5.6

3. Caracterização experimental da alvenaria de adobe em compressão

Para caracterizar o comportamento da alvenaria de adobe sujeita a compressão uniaxial monotónica, foram construídos em laboratório prismas com dimensões de 200×200×400 mm³, sendo cada um constituído por três blocos de adobe provenientes da casa H_12 e por 4 juntas horizontais da argamassa referida no ponto anterior, ver Figura 2a. Após a sua construção, os prismas foram cobertos com um pano húmido, de forma a minimizar a fendilhação por retracção da argamassa, durante três semanas, em que o pano era constantemente humedecido. De referir que a cura da argamassa das juntas foi bastante demorada, devido ao facto de ser uma argamassa de cal hidratada com comportamento aéreo, em que o seu endurecimento ocorre por carbonatação.

Assim, apenas foi possível transportar os prismas para o interior de uma câmara climática seis semanas após a sua construção. A utilização de uma câmara climática permitiu manter os prismas num ambiente com temperatura e humidade controladas, até estes serem ensaiados à compressão. A câmara foi programada para manter uma temperatura e humidade constantes de 20°C e 57.5%. De referir que os ensaios de fluência acelerada foram realizados no interior desta câmara climática.

Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados no bastidor apresentado na Figura 2b, através da aplicação de uma carga monotónica em controlo de deslocamento e com uma velocidade de 3 µm/s. Entre a chapa de topo e o prato do bastidor foi colocada uma rótula, enquanto que a rotação na base foi impedida. A deformabilidade dos prismas foi avaliada de duas formas distintas, através da medição dos deslocamentos entre os pratos do bastidor (medição externa) e medição dos deslocamentos entre pontos localizados nas quatro faces dos provetes (medição interna). Enquanto foi possível obter medições internas fidedignas (até ao início da fendilhação), verificou-se uma muito boa concordância entre as medições interna e externa. Face à boa comparação encontrada e com o objectivo de descrever o comportamento pós-pico dos prismas, os resultados apresentados neste trabalho são baseados na medição externa.

Na Tabela 3 apresenta-se, para os quatro prismas ensaiados aos 80 dias de idade, o valor da resistência à compressão (f_c) e da respectiva extensão associada (ϵ_{ult}) bem como do módulo de elasticidade calculado no intervalo 30% - 60% da resistência à compressão ($E_{[30; 60]}$), bem como o valor médio e o coeficiente de variação de cada um destes parâmetros. O valor médio da resistência à compressão foi de 1.17 N/mm², o que é um valor próximo da resistência tanto do bloco como da argamassa. Relativamente à variabilidade deste parâmetro, também é relativamente baixa apresentando um coeficiente de variação de 14.4%. Contrariamente, o módulo de elasticidade dos

prismas, tal como o dos provetes de adobe, apresenta uma variabilidade considerável, com um coeficiente de variação de 55.3%, sendo o seu valor médio de 494 N/mm².

Na Figura 3a apresentam-se as curvas tensão-extensão de cada prisma, onde é claramente visível a dispersão do comportamento em termos de deformabilidade, identificada anteriormente, existindo prismas com comportamento linear praticamente até ao pico com ocorrência do comportamento não linear próxima do pico, e existindo prismas com quebra progressiva de rigidez, com a fendilhação a ocorrer para cargas claramente inferiores ao valor de pico.

Tabela 3 – Resultados dos ensaios monotónicos em prismas de alvenaria de adobe.

Prisma	f_c (N/mm ²)	ϵ_{ult} (mm/m)	$E_{[30; 60]}$ (N/mm ²)
MCAP1	1.07	5.2	215
MCAP2	1.00	2.2	822
MCAP3	1.26	4.7	604
MCAP4	1.37	5.3	334
Média	1.17	4.4	494
CV (%)	14.4	33.6	55.3

Estes resultados evidenciam a influência do processo manual de fabrico dos blocos, associado à utilização de materiais naturais, na variabilidade dos parâmetros elásticos e mecânicos caracterizados, sendo claramente superior para o parâmetro elástico.

O padrão de fendilhação é caracterizado pela ocorrência de fendas verticais sensivelmente distribuídas em cada face, identificando-se, por vezes, uma fenda vertical principal. Em alguns provetes as fendas que se desenvolveram durante o ensaio não atravessaram completamente a respectiva face, ver Figura 3b.

4. Caracterização experimental diferida da alvenaria de adobe (pseudo-fluência)

Para avaliar o comportamento diferido da alvenaria de adobe foram realizados ensaios de pseudo-fluência em quatro prismas iguais aos descritos anteriormente. Os ensaios monotónicos acima descritos foram essenciais para a definição da história de carregamento a aplicar aos prismas. Assim, o valor médio da resistência à compressão obtido nos ensaios monotónicos foi tomado como valor de referência para todos os prismas ensaiados em fluência acelerada, sendo os valores dos patamares de carga definidos em função deste. Na Figura 4a apresenta-se a história de carregamento definida para cada prisma. Cada patamar de carga foi definido com uma duração de sensivelmente 24 horas e cada incremento de carga foi definido com o valor de 10% do valor de referência, com a excepção do primeiro e segundo incrementos, que foram definidos para 40% e 20% daquele valor, respectivamente. A opção pela realização de incrementos de carga iniciais maiores está relacionada com o facto de em alvenaria a fluência iniciar-se geralmente para cargas superiores a 40% da resistência à compressão. No caso dos prismas ultrapassarem o valor de referência definido, prossegue-se o ensaio com sucessivos incrementos de 10% do valor de referência durante 24 horas, até ocorrer a rotura. Os ensaios de pseudo-fluência foram realizados nos bastidores apresentados na Figura 4b, tendo sido ensaiados dois prismas em simultâneo em cada bastidor. Foram medidos tanto os deslocamentos verticais como horizontais de cada face, recorrendo-se ao dispositivo (alongómetro) apresentado na Figura 4c. Os prismas foram ensaiados 96 dias após a sua construção. Na Tabela 4 apresenta-se, para cada prisma, a resistência à compressão obtida nos ensaios de pseudo-fluência (f_{cc}), o módulo de elasticidade calculado para o intervalo de referência de 40% - 60% da resistência à

compressão ($E_{[40; 60]}$), bem como os respectivos valores médios e coeficientes de variação.

Tabela 4 – Resultados dos ensaios de pseudo-fluência em prismas de alvenaria de adobe.

Prisma	f_{cc} (N/mm ²)	$E_{[40; 60]}$ (N/mm ²)
STCAP1	1.87	642
STCAP2	1.72	491
STCAP3	1.29	436
STCAP4	1.40	502
Média	1.57	517
CV (%)	17.2	17.0

O valor médio da resistência à compressão obtido nos ensaios de pseudo-fluência foi de 1.57 N/mm², superior ao valor obtido nos ensaios monotônicos. Tendo em conta que a bibliografia de referência indica que a resistência da alvenaria em ensaios de fluência é cerca de 60% a 70% da tensão de compressão obtida em ensaios monotônicos (Valluzzi et al, 2005), esta aparente contradição pode ser explicada por duas ordens de razões. Em primeiro lugar, o decréscimo observado em ensaios fluência refere-se a ensaios de fluência a longo prazo ("*long-term creep*") e não a ensaios de fluência acelerada. Por outro lado, a idade relativamente jovem dos provetes associada à idade superior dos provetes ensaiados em fluência acelerada poderá justificar a maior resistência mecânica observada. Relativamente à dispersão da resistência à compressão, o seu valor é da mesma ordem de grandeza do apresentado para os ensaios monotônicos dos prismas, com um coeficiente de variação de 17.2%.

O valor médio do módulo de elasticidade foi de 517 N/mm², bastante próximo do obtido para os ensaios monotônicos, porém a dispersão obtida foi inferior, com um valor do coeficiente de variação de 17.0%.

Na Figura 5 apresentam-se as curvas temporais tempo - extensão vertical (ϵ_v) tempo - extensão horizontal (ϵ_h) de cada prisma. Da observação da Figura 5a, verifica-se que quanto maior é a carga aplicada maior é a deformação diferida, indicando que a deformação por fluência intensifica-se com o nível de carga a que os prismas são sujeitos. Verifica-se, ainda, que não é possível identificar se, em cada patamar, se há início da segunda fase da fluência. Deste modo, constata-se que os ensaios de pseudo-fluência realizados apenas conseguem transmitir uma ideia qualitativa do comportamento da alvenaria à fluência. Observando a Figura 5b, é possível obter uma ideia da progressão da fendilhação que está de certa forma associada às extensões horizontais. A fendilhação apenas se torna visível a olho nu para patamares de carga muito próximos da rotura, correspondendo no gráfico da Figura 5b a aumentos pronunciados da extensão horizontal. O padrão de fendilhação do prisma STCAP4 é apresentado na Figura 6, caracterizando-se como sendo essencialmente vertical, com fendas algo dispersas e algumas destas com reduzida abertura. A rotura destes prismas não ocorreu explosivamente de acordo com relatos de alguns colapsos mencionados na bibliografia, mas sim de uma forma suave e com grandes deformações. Contudo, a validação deste aspecto para a alvenaria de adobe requer a realização de mais ensaios experimentais.

5. Conclusões

A partir dos ensaios experimentais discutidos neste trabalho verifica-se que tanto os blocos como a alvenaria de adobe apresentam uma baixa resistência à compressão e

uma grande variabilidade em termos de deformabilidade, associada ao seu processo de produção manual.

A partir dos ensaios de pseudo-fluência verificou-se que a fluência ocorre com alguma relevância em alvenaria de adobe tornando-se mais significativa para valores de carga próximos da resistência última e que a fendilhação é visível apenas para níveis de tensão muito próximos da capacidade de carga.

Evidenciou-se ainda a limitação dos ensaios de pseudo-fluência em caracterizar de forma completa o comportamento à fluência de alvenaria de adobe, pelo que será essencial a realização de ensaios de fluência a longo prazo para caracterizar completamente o comportamento diferido das construções de adobe.

De uma forma geral, os resultados obtidos evidenciam a importância do processo manual de fabrico dos blocos e da alvenaria, associado à utilização de materiais naturais, na variabilidade das propriedades materiais caracterizadas.

Bibliografia

- BINDA, L., SAISI, A., MESSINA, S., TRINGALIL, S. (2001): Mechanical damage due to long term behaviour of multiple leaf pillars in Sicilian Churches, Historical Constructions 2001 - Possibilities of numerical and experimental techniques, pp. 707-717.
- FERRETTI D., BAŽANT Z. P. (2006): Stability of ancient masonry towers: Moisture diffusion, carbonation and size effect, Cement and Concrete Research, pp. 1379-1388.
- IGNOUL S., SCHUEREMANS L., TACK J., SWINNEM L., FEYTONS S., BINDA L., TALIERCIO A., PAPA E., ANZANI A., VAN GEMERT D., VAN BALEN K. (2006): Creep behaviour of masonry structures – failure prediction based on a rheological model and laboratory tests, Structural Analysis of Historical Constructions, New Delhi.
- NEVILLE, A.M. (1995): Properties of concrete. Pitman Publishing, London.
- PINA-HENRIQUES J. (2005): Masonry Under Compression: Failure Analysis and Long-Term Effects, PhD dissertation, Universidade do Minho, Guimarães (disponível a partir de www.civil.uminho.pt/masonry).
- VALLUZZI M. R., BINDA L., MODENA C. (2005): Mechanical behaviour of historic masonry Structures strengthened by bed joints structural repointing, Construction and Building Materials, pp. 63-73.

Curriculum dos autores:

Daniel Oliveira

Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal

Humberto Varum

Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Portugal

Rui Silva

Bolseiro de Investigação, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal

Henrique Pereira

Bolseiro de Investigação, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Portugal

Paulo Lourenço

Professor Catedrático, Departamento de Engenharia Civil, Universidade do Minho, Portugal

Aníbal Costa

Professor Catedrático, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Portugal