

Estudo do comportamento estrutural de “abobadilhas” alentejanas através de ensaios de carga

João Rei Academia Militar (CINAMIL & CERIS), jcmrei@gmail.com

António Sousa Gago Instituto Superior Técnico (CERIS), Universidade Técnica de Lisboa, antonio.gago@tecnico.ulisboa.pt

RESUMO

Até meados do século XX era habitual o recurso a abobadas de alvenaria na execução de coberturas e pavimentos em edifícios. Nas regiões contíguas com a Estremadura Espanhola era prática corrente o uso de abóbadas finas, executadas com tijoleiras de três a cinco centímetros de espessura, assentes ao baixo com argamassa de presa rápida, à base de gesso. A colocação das tijoleiras ao baixo (resultando num menor peso por unidade de superfície) e a utilização da argamassa de presa rápida permitiam a execução deste tipo de abóbadas sem recurso a cimbres, ou, quanto muito, com sistemas ligeiros de guiamento e suporte. Foi uma técnica muito usada na bacia do Mediterrâneo, particularmente nas regiões espanholas da Catalunha e Estremadura, e no Alentejo, do lado português, onde é tradicionalmente conhecida por “abobadilha” alentejana. Em 1892 a técnica foi patenteada nos Estados Unidos da América pelo arquiteto catalão Rafael Guastavino, onde a utilizou em obras de referência, como é o caso da abóbada do cruzeiro da Catedral de S. João, o Divino, na cidade de Nova Iorque.

Para além da curiosidade histórica e do interesse desta técnica construtiva para uso em intervenções de reabilitação do património construído, a técnica tem um enorme potencial construtivo e estrutural, sendo possível a sua utilização em novas aplicações, muitas delas fora do seu âmbito tradicional. Justifica-se, portanto, um estudo mais aprofundado e quantitativo das capacidades estruturais das abobadilhas alentejanas, que, entre outros aspetos, permita a avaliação da capacidade estrutural destas construções.

No presente artigo apresentam-se os resultados de ensaios experimentais e de ensaios numéricos (através de modelos de elementos discretos tridimensionais) recentemente realizados. Os estudos descritos no artigo visam contribuir para a quantificação da capacidade resistente da solução em “abobadilha” alentejana e integram-se numa investigação mais alargada, em curso, sobre esta técnica construtiva.

PALAVRAS-CHAVE “abobadilha” alentejana . abóbada . alvenaria . ensaios . resistência

1. INTRODUÇÃO

Desde sempre, o maior desafio da construção foi o de vencer vãos sob os quais o homem se pudesse abrigar, ou para permitir a ligação entre margens de rios ou de outros obstáculos. Inicialmente, tal era conseguido recorrendo a elementos em madeira, mas devido à sua fraca durabilidade e o mau comportamento ao fogo os construtores ambicionavam elementos em materiais com

maior durabilidade. A alvenaria, usada nos elementos estruturais verticais, era o material que cumpria as exigências pretendidas, apresentando uma elevada durabilidade e uma excelente resistência para solicitações de compressão. Contudo, a sua diminuta resistência à tração e, consequentemente, fraca resistência a esforços de flexão, impedia a sua utilização em elementos lineares horizontais, sujeitos a esforços de flexão. Só com os Etruscos (900-27 A.C.) e poste-

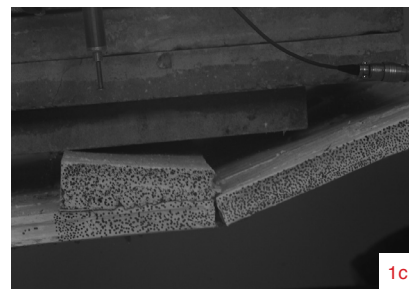
riormente com os Romanos [1], o homem descobriu¹ o “arco”, geometria que permitia vencer vãos com elementos sujeitos apenas a esforços de compressão, isto é, sem que se gerem tensões de tração e de flexão nos elementos estruturais. O entendimento do funcionamento estrutural do arco e a generalização da utilização da forma arqueada nas construções foi um marco na história da construção, quase tão importante na história da civilização, como o foi a descoberta



Carga Distribuída



Carga Linear



Rótula no colapso

da roda. Ao longo dos séculos, o homem foi aperfeiçoando as técnicas construtivas das estruturas arqueadas em alvenaria, desenvolvendo diversas alternativas (arco, abóbada, cúpula) e dentro delas, múltiplas variantes. As abóbadas finas executadas com tijoleiras cerâmicas (de três a cinco centímetros de espessura) assentes ao baixo com argamassa de secagem rápida à base de gesso, constitui uma das mais notáveis variantes, por permitir estruturas de elevada esbelteza, executadas sem o recurso a cimbramentos ou estruturas de suporte temporárias². Essa variante foi largamente usada na bacia do Mediterrâneo, desconhecendo-se a sua origem exata, sendo no entanto possível identificar uma importante influência Espanhola (sobretudo das regiões da Catalunha e da Estremadura) [2, 3]. Esta solução é identificável noutras regiões da Europa meridional e em Portugal existe sobretudo no Alentejo [4], onde é conhecida por “abobadilha alentejana”³. Mais recentemente, no final do século XIX, a eficiência estrutural desta solução e as suas vantagens do ponto de vista da economia do processo construtivo resultaram na disseminação desta técnica no continente americano, em particular nos Estados Unidos da América⁴. Rafael Guastavino (1842-1908), um arquiteto e construtor Catalão, patenteou nos EUA, em 1892, a técnica construtiva de abóbadas com tijoleiras assentes ao baixo com argamassas à base de cal e erigiu algumas obras de referência [5]. Outros arquitetos de renome utilizaram esta solução, sendo de referir os casos de Antoni Gaudí (1856-1926), na

Catalunha, Rogelio Salmons (1927-2007), na Colômbia, Eduardo Sacriste (1905-99), na Argentina, Antonio Bonet (1913-89), na Argentina e Uruguai, e Le Corbusier (1887-1965), em França, na Suíça e na Índia. Contudo, com o aparecimento dos materiais modernos (o aço estrutural e o betão armado) a construção de abóbadas e arcos em alvenaria foi perdendo espaço e no final do século XX existiam poucos mestres pedreiros capazes de conceber e construir abóbadas em alvenaria, e, menos ainda, utilizando a técnica das abobadilhas alentejanas. Nos tempos mais recentes, a curiosidade histórica sobre esta técnica construtiva e a atividade de reabilitação do património construído deram origem a diversos trabalhos de investigação [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17] que contribuíram para a utilização das “abóbadas finas de tijoleiras cerâmicas assentes ao baixo” em novas aplicações, muitas delas fora do seu âmbito tradicional [18, 19]. Por outro lado, o bom desempenho e eficiência estrutural e a possibilidade de aproveitamento de recursos locais, materiais e humanos, fez ressurgir a solução no contexto de habitações de baixo custo para uso em países africanos em desenvolvimento [20, 21]. Porém, o conhecimento estrutural das “abóbadas finas de tijoleiras cerâmicas assentes ao baixo” é ainda limitado e são raras as investigações que contribuíram para a quantificação das suas capacidades resistentes. Justifica-se, portanto, aprofundar o estudo das capacidades estruturais dessas abóbadas, que, entre outros aspetos, permita a avaliação da sua

1 | Ensaio ES8: “abobadilha” extrudorsada com sacos de areia.

capacidade estrutural. Este artigo pretende contribuir para o conhecimento das capacidades estruturais das “abobadilhas alentejanas” (doravante designadas apenas por “abobadilhas”), através da apresentação dos resultados de ensaios experimentais e numéricos levados a cabo sobre protótipos de “abobadilhas”.

2. CAMPANHA DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS

2.1 Introdução

Na presente investigação levou-se a cabo um conjunto de ensaios experimentais sobre “abobadilhas” de berço à escala real com o objetivo de identificar capacidades estruturais e de calibrar modelos computacionais que possibilitem a verificação da segurança estrutural de situações não estudadas experimentalmente. Do trabalho experimental já realizado, o presente artigo descreve os ensaios executados em cinco protótipos de abobadilhas de berço à escala real, com 2.45 m de vão, uma flecha de 0.35 m, 3 cm de espessura e 1 m de largura. Os protótipos foram submetidos a carregamentos uniformes até um nível de carga de 2.40 kN/m² (ES8: 3.20kN/m²) e, posteriormente, a uma carga



Carga Distribuída



Carga Linear



Colapso: formação das rótulas plásticas (Carga Linear)

linear (ou de faca) aplicada a 1/3 do vão sucessivamente crescente até ao colapso do protótipo. Os protótipos foram permanentemente monitorizados durante os ensaios e foram registadas as intensidade das cargas e dos “empuxos”⁵, bem como as deformações.

2.2 Configuração experimental

Os protótipos foram executados com tijolos furados de dimensões de 24x12x3 cm³, assentes com argamassa à base de gesso de secagem rápida. As nascenças das “abobadilhas” foram construídas sobre perfis metálicos UNP 140 suportados por dois apoios: um apoio fixo numa das extremidades e um apoio móvel, na outra extremidade. Os apoios foram ligados através de dois tirantes em aço de diâmetros de 8 mm (protótipos ES8, EI8.1 e EI8.2) e de 12 mm (protótipos EI12.1 e EI12.2). A introdução de um apoio móvel numa das extremidades da “abobadilha” possibilitou a monitorização do “empuxo”, tendo-se utilizado pares de tirantes com diâmetros diferentes (8 e 12 mm) para simular o efeito da rigidez horizontal dos apoios na resposta da “abobadilha”. Antes da execução da “abobadilha” os tirantes metálicos foram ligeiramente tensionados para eliminar folgas⁶. Assim, no final da execução da “abobadilha”, os tirantes ficaram sujeitos a um esforço axial correspondente a essa tensão inicial e ao “empuxo” transmitido pela “abobadilha” aos apoios. Previamente à execução do ensaio de carga, os tirantes foram substituídos por outros, idênticos, mas ligados a células de carga que possibilitaram o registo

das forças instaladas nos tirantes. Foi efetuado um procedimento de transferência de carga e os novos tirantes ficaram sujeitos a um esforço axial semelhante ao dos tirantes originais. Estes esforços axiais foram registados e designam-se no presente documento por “esforços axiais iniciais” dos tirantes. Os deslocamentos verticais dos protótipos foram medidos através de 2 defletómetros colocados no seu extradorso, posicionados a meio vão e a um terço de vão.

2.3 Ensaios experimentais e resultados

Cada um dos cinco protótipos foi submetido a dois ensaios de carga, nos quais o carregamento foi materializado por lajetas de betão, com dimensões de 60x40x5 cm³ e massa de 25 kg (245 N). No primeiro ensaio de carga as “abobadilhas” de 2.45 m de vão livre, 3 cm de espessura e 1 m de largura foram sujeitas a uma carga distribuída, aplicada no seu extradorso (figura 1 e figura 2), crescente até um valor máximo 3.20 kN/m² (quatro fiadas de oito lajetas – 800 kg numa área horizontal de 2.45 m²) na variante ES8 (Fig. 1), e de 2.40 kN/m² (três fiadas de oito lajetas - 600 kg numa área horizontal de 2.45 m²) nas variantes EI8 e EI12 (figura 2). No segundo ensaio, sujeitaram-se os protótipos a uma carga linear aplicada a um terço do vão, crescente até ao colapso do protótipo. A carga linear foi aplicada pela colocação das referidas lajetas na largura (1 m) do protótipo, sobre um enchimento nivelador em argamassa (figura 1c). O protótipo ES8 teve algumas particularidades em relação aos restantes ensaios.

2.1 Ensaios EI8 e EI12:
“abobadilha” não extradorsada.

Para se identificar o efeito dum eventual enchimento do extradorso da “abobadilha”, o extradorso do protótipo ES8 foi previamente carregado com sacos de areia, cada um com uma massa de 25 kg. Os sacos de areia pretendiam simular um enchimento de nivelamento do extradorso e foram colocados em cada um dos lados do extradorso sete sacos de areia (densidade de 1450 kg/m³), correspondendo a um total de 1.71 kN. Esses sacos que se mantiveram durante a aplicação do carregamento distribuído, correspondem a um enchimento do extradorso até a uma altura de 0.32 m na zona central, aproximadamente, 90% da flecha. No segundo ensaio de carga do protótipo ES8 alguns desses sacos foram removidos porque impediam a aplicação da carga linear. Foram removidos quatro sacos de areia na zona central do protótipo, dois de cada lado (figura 1b). Assim, o carregamento com a carga linear foi realizado com apenas dez sacos no extradorso do protótipo (cinco em cada lado), correspondente a um enchimento do extradorso até 0.22 m, aproximadamente, 2/3 da flecha⁷. Nos ensaios EI8 e EI12, os protótipos apresentaram deformações a meio vão próximas de 1 mm para carregamentos uniformes correspondentes a 2.40 kN/m², tendo-se interrompido o ensaio nesse nível de carga para prevenir o colapso

Tabela 1 | Resultados experimentais – carga distribuída

	Carga (kN/m ²)	Deslocamento Vertical (mm)		Deslocamento horizontal (mm)		Esforço Axial Inicial (kN)		Força nos Tirantes (kN)	
		D1 1/3 vão	D2 1/2 vão	D3	D4	Tirante 1	Tirante 2	Tirante 1	Tirante 2
ES8	2.40	0.83* (0.60**)	0.97* (0.79**)	-	-	2.14	2.12	4.44	3.93
	3.20	1.02* (0.79**)	1.23* (1.05**)	-	-	2.14	2.12	5.08	4.35
EI8.1	2.40	0.96	1.04	0.75	0.54	2.67	1.34	4.41	3.43
EI8.2		0.95	1.31	0.68	0.41	1.69	0.99	3.43	3.00
EI12.1		0.73	0.78	0.01	0.83	1.35	1.10	3.13	3.29
EI12.2		0.93	0.94	0.53	0.50	1.94	1.71	3.75	3.92

(*) inclui a deformação causada pelo enchimento do extradorso (com 14 sacos de areia).

(**) excluindo a deformação causada pelo enchimento do extradorso (com 14 sacos de areia).

Tabela 2 | Resultados experimentais – carga linear

	Carga Colapso (kN/m ²)	Carga Pré Colapso (kN/m ²)	Deslocamento Vertical (mm)		Deslocamento horizontal (mm)		Esforço Axial Inicial (kN)		Força nos Tirantes (kN)	
			D1 1/3 vão	D2 1/2 vão	D3	D4	Tirante 1	Tirante 2	Tirante 1	Tirante 2
ES8	4.17	3.68	1.23*	0.49*	-	-	2.14	2.12	3.55	3.50
EI8.1	3.68	3.19	1.75	0.74	0.59	0.47	2.67	1.34	3.75	2.71
EI8.2	2.94	2.70	1.57	0.64	0.49	0.34	1.69	0.99	2.72	2.26
EI12.1	2.70	2.21	1.69	0.29	0.01	0.34	1.35	1.10	2.20	2.21
EI12.2	3.19	2.70	1.68	0.65	0.41	0.50	1.94	1.71	2.92	1.26

(*) excluindo a deformação causada pelo enchimento do extradorso (com 10 sacos de areia).

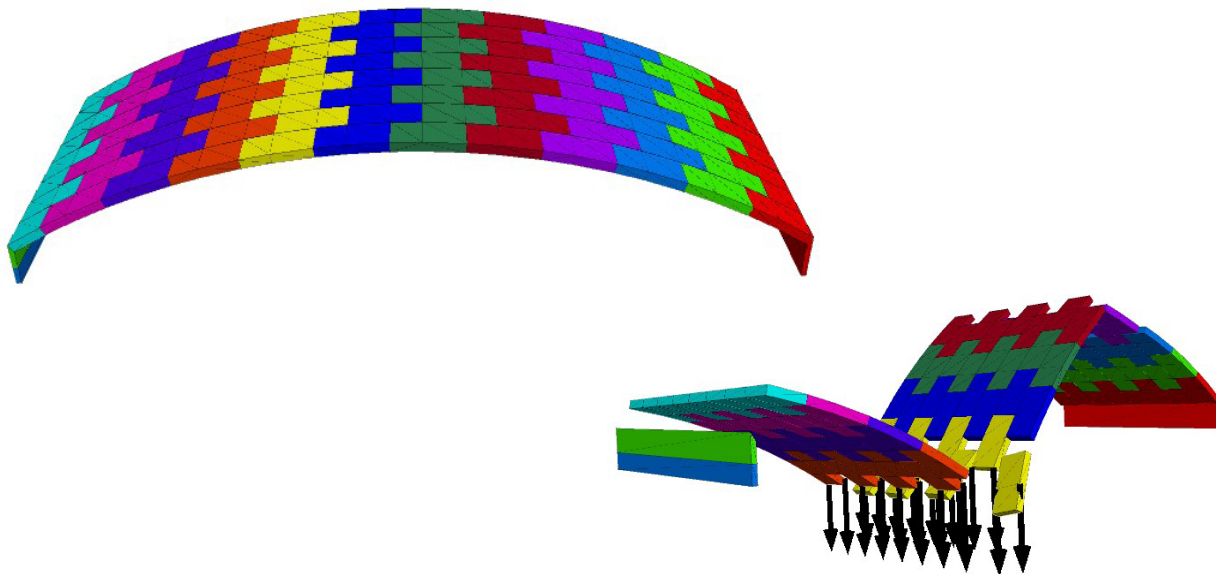
Nota: Entende-se como Carga Pré Colapso, a carga correspondente ao nível de carregamento imediatamente anterior ao carregamento que causou o colapso (no qual não foi possível registrar resultados).

dos protótipos. Dado que o carregamento do extradorso tornou a “abobadilha” mais estável⁹ foi possível aplicar no protótipo ES8 um carregamento mais intenso que o considerado nos outros ensaios (mais uma fiada de lajetas de betão), tendo-se atingido o mesmo nível de deformação (ca. 1 mm) para uma carga uniforme ligeiramente superior (3.20 kN/m²). De referir, ainda, que no protótipo ES8 o apoio fixo era um pouco mais rígido que o correspondente apoio nos protótipos EI8 e EI12. No protótipo ES8 o apoio fixo era constituído por uma base em betão, ao passo que nos outros essa base foi substituída por dois perfis metálicos HEA 200. As grandezas registadas nos ensaios estão resumidas nas tabelas 1 e 2. Os deslocamentos indicados são medidos em relação à situação da “abobadilha” após a aplicação das tensões iniciais nos tirantes, mas antes de qualquer tipo de carregamento.

2.4 Análise de resultados

Os ensaios revelaram que, não obstante uma elevada esbelteza ($t/L = 0.012$), as “abobadilhas” apresentam boa capacidade estrutural para cargas verticais, sobretudo para solicitações uniformes. Todas as soluções suportaram sem danos e com reduzida deformabilidade (deslocamentos da ordem de 1 mm; aprox. $L/2450$) a ação duma carga uniformemente distribuída de 2.40 kN/m². Como esperado, a solução “extradorsada”, isto é, com nivelamento do extradorso, apresentou um comportamento mais estável, tendo sido possível aplicar uma carga uniforme de 3.20 kN/m², sem danos e com o mesmo nível de deformação. De referir que, descontando a deformabilidade inicial devida ao carregamento do extradorso com sacos de areia, a deformabilidade da “abobadilha” “extradorsada” é, para um mesmo nível de carga, cer-

ca de 1/3 menor que a deformabilidade das soluções equivalentes não “extradorsadas”. No que diz respeito à capacidade estrutural das “abobadilhas” quando sujeitas a carregamentos lineares localizados a 1/3 de vão⁹, os protótipos não “extradorsados” apresentaram cargas de colapso da ordem dos 3 kN/m para os vários níveis de “esforço axial inicial” nos tirantes (3.68-3.19 kN/m para um nível médio de “esforço axial inicial” nos tirantes próximos de 2.00 kN e 2.70-2.94 kN/m para um nível mais baixo, próximo de 1.30 kN). No protótipo “extradorsado”, no qual foi introduzido um “esforço axial inicial” nos tirantes semelhante ao dos protótipos EI8 e EI12 mais resistentes, registou-se uma carga de colapso de 4.17 kN/m, cerca de 20% superior à carga de colapso dos correspondentes modelos EI8 e EI12. O efeito favorável do enchimento do extradorso dos arcos identificado nos ensaios experimentais é conhecido



3

[26, 27, 28] e deve-se [22] ao facto desse enchimento i) produzir uma linha de pressões com perfil próximo do eixo do arco, atrasando os efeitos que possam tender a modificar o perfil da linha de pressões para situações instáveis; ii) aumentar o nível de compressão nas aduelas e, consequentemente, o atrito nos contactos, prevenindo o deslizamento; iii) possibilitar, desde que o enchimento apresente consistência suficiente, que a linha de pressões se posicione fora da espessura do arco e iv) introduzir restrições ao movimento horizontal do arco ou abóbada. No presente estudo experimental, constatou-se o efeito benéfico do enchimento, não obstante os relevantes efeitos referidos em iii) e iv), não se fizessem sentir. De notar que, uma vez que o enchimento com sacos de areia não é rígido e as condições de fronteira dos protótipos não impediram o deslocamento horizontal, é de esperar que os efeitos benéficos do enchimento sejam superiores em condições reais. Verificou-se que o efeito da secção transversal dos tirantes é pouco relevante em termos de deformabilidade e de resistência, desde que (como foi o caso) os tirantes apresentem rigidez e resistência suficientes para se opor à abertura do vão da abobadilha. Seria de esperar que os protótipos EI12 apresentassem resistência ligeiramente superior à dos protótipos EI8 (tirantes de maior diâmetro introduzem maior restrição ao deslocamento do apoio móvel), mas como os valores dos “esforço axial inicial” nos tirantes dos protótipos EI8 foram ligeiramente superiores aos dos protótipos EI12, esse efeito não se fez

sentir. De facto, mais importante que a secção transversal dos tirantes é o efeito do “esforço axial inicial” nos tirantes.

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA

3.1 Modelos e resultados

Com o intuito de generalizar os resultados obtidos na campanha experimental, construíram-se modelos numéricos para simulação de situações de carga e geometrias não explicitamente testadas experimentalmente. Os modelos basearam-se no método dos elementos discretos [23, 24] que se mostrou adequado na simulação deste tipo de estruturas em trabalhos anteriores [12, 25]. Os modelos reproduziram a geometria dos protótipos e as respetivas condições de fronteira (figura 3) e foram construídos com blocos rígidos. Os danos e toda a deformabilidade foi concentrada nos contactos entre blocos. Os valores adotados para as características mecânicas dos contactos (ângulo de atrito $= 35^\circ$, constantes de rigidez normal e tangencial de 10 GPa/m, coesão $= 0.47$ MPa, resistência à tração $= 0.04$ MPa) resultaram da calibração experimental. Os tirantes foram simulados com os diâmetros respetivos e admitindo comportamento elástico linear ($E = 200$ GPa).

Os resultados estão resumidos nas tabelas 3 e 4. Os deslocamentos indicados são medidos em relação à situação da “abobadilha” após a aplicação das tensões iniciais nos tirantes, mas antes de qualquer tipo de carregamento.

31 *Modelo numérico: posição indeformada e em colapso sob a ação da carga linear.*

3.2 Análise de resultados

Os resultados numéricos são próximos dos resultados experimentais, podendo considerar-se que a calibração dos modelos é suficientemente boa. Assim, será possível modelar situações não especificamente simuladas experimentalmente, como por exemplo, apoios rígidos que impeçam qualquer tipo de deslocamento. Nesse caso, o modelo numérico indica que a “abobadilha” em estudo (vão de 2.45 m e espessura de 3 cm), sem enchimento no extradorso, apresentará para uma carga uniforme de 2.40 kN/m^2 uma deformação a meio vão de 0.29 mm e colapsará para uma carga linear aplicada a um terço de vão de 2.94 kN/m , com uma deformação pré-colapso sob o ponto de aplicação da carga de 0.70 mm . Na hipótese da “abobadilha” com enchimento no extradorso (apenas efeito de carga), o colapso ocorrerá para uma carga linear a um terço do vão de 3.19 kN/m .

CONCLUSÕES

Dos resultados obtidos, destaca-se a extraordinária eficiência estrutural das “abobadilhas”, levando em linha de conta a sua reduzida espessura. Os protótipos, com 3 cm de espessura,

Tabela 3 | Resultados numéricos – carga distribuída

Protótipo	Carga Colapso (kN/m²)	Deslocamento Vertical (mm)		Deslocamento horizontal (mm)		Esforço Axial Inicial (kN)		Força nos Tirantes (kN)	
		D1 1/3 vão	D2 1/2 vão	D3	D4	Tirante 1	Tirante 2	Tirante 1	Tirante 2
ES8	2.40	1.23*	1.35*	0.78	0.78	2.14	2.12	3.72	3.69
	3.20	1.53*	1.71*	0.97	0.97			4.48	4.46
EI8.1	2.40	0.94	1.08	0.57	0.57	2.67	1.34	3.29	2.45
EI8.2		0.92	1.05	0.56	0.56	1.69	0.99	3.11	2.41
EI12.1		0.56	0.65	0.26	0.26	1.35	1.10	2.98	2.73
EI12.2		0.57	0.65	0.26	0.26	1.94	1.71	3.01	2.78

Nota: os deslocamentos são medidos em relação à posição da “abobadilha” após a aplicação das tensões iniciais nos tirantes, mas antes de qualquer tipo de carregamento.

(*) inclui a deformação causada pelo enchimento do extradorso (com 14 sacos de areia).

Tabela 4 | Resultados numéricos – carga linear

Protótipo	Carga Colapso (kN/m²)	Deslocamento Vertical (mm)		Deslocamento horizontal (mm)		Esforço Axial Inicial (kN)		Força nos Tirantes (kN)	
		D1 1/3 vão	D2 1/2 vão	D3	D4	Tirante 1	Tirante 2	Tirante 1	Tirante 2
ES8	2.70	1.20*	0.77*	0.46	0.46	2.14	2.12	2.41	2.38
EI8.1	2.94	1.18	0.72	0.38	0.38	2.67	1.34	2.54	1.69
EI8.2	2.70	1.07	0.63	0.35	0.35	1.69	0.99	2.23	1.54
EI12.1	2.70	0.84	0.39	0.16	0.16	1.35	1.10	2.05	1.80
EI12.2	2.70	0.85	0.39	0.16	0.16	1.94	1.71	2.07	1.84

Nota 1: os deslocamentos são medido em relação à posição da “abobadilha” após a aplicação das tensões iniciais nos tirantes, mas antes de qualquer tipo de carregamento.

Nota 2: Os valores indicados referem-se ao valor da carga imediatamente antes do colapso do modelo numérico.

(*) inclui a deformação causada pelo enchimento do extradorso (com 10 sacos de areia).

suportaram níveis de carga uniforme superiores a 2 kN/m² sem danos e com reduzidas deformações. Como esperado, os protótipos apresentaram menor eficiência para carregamentos assimétricos, nomeadamente para os carregamentos lineares a 1/3 do vão. Os carregamentos lineares foram aplicados de forma crescente, tendo-se levado os protótipos ao colapso nessas situações de carga. O efeito favorável do enchimento no extradorso das abobadilhas foi identificado nos ensaios experimentais e devidamente simulado pelos modelos numéricos. Não obstante, é de referir que o enchimento foi realizado através da aplicação de sacos de areia, pelo que apenas se simulou o efeito favorável respeitante ao peso do enchimento. Outros efeitos, como a rigidificação lateral, não foram simulados experimental ou numericamente. Finalmente, as “abobadilhas” cerâmicas apresentaram um comportamento extremamente frágil: deformações relativamente reduzidas com um colapso súbito, sem aviso prévio. De facto,

tratando-se dum colapso relacionado com um fenómeno de instabilidade¹⁰ não são detetáveis esmagamentos, fraturas e deformações relevantes imediatamente antes do colapso, o qual ocorre de forma súbita e repentina. O comportamento frágil destas estruturas é uma característica que deve ser tomada em consideração, por exemplo na avaliação da segurança estrutural de exemplares danificados, ou em eventuais (não recomendáveis) ensaios de carga. Os modelos numéricos elementos discretos constituem uma ferramenta a ter em conta na simulação do comportamento mecânico das “abobadilhas”, uma vez que, de modo geral, os resultados numéricos corroboram os resultados experimentais (em termos de capacidades resistentes e deformabilidade). Aproveitando a calibração do modelo numéricos com os resultados experimentais, foi possível simular o comportamento do protótipo numa situação de apoios totalmente fixos, confirmando-se um acréscimo de resistência. Os modelos numéricos permitirão em

trabalhos futuros simular outras situações não testadas experimentalmente, sendo objetivo da presente investigação utilizar esses resultados no desenvolvimento de tabelas para na conceção segura de estruturas deste tipo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do engenheiro José Vieira de Lemos na construção e calibração dos modelos de elementos discretos. Os autores agradecem ao Comando da Academia Militar ao Laboratório LERM do IST o apoio e a disponibilização de equipamentos / infra-estruturas que permitiram a realização da parte experimental subjacente ao presente artigo ■



Versão resumida do artigo

NOTAS

1 Não obstante seja reconhecido que o império romano foi essencial para o desenvolvimento e generalização do arco, há registo da utilização pontual de arcos em civilizações anteriores, como é o caso do império Persa [1].

2 A colocação das tijoleiras ao baixo (menor peso por unidade de superfície), juntamente com argamassa de presa rápida permite a execução sem cimbres, ou, quanto muito, com sistemas ligeiros de guiamento e suporte.

3 Por facilidade, em alternativa a uma designação mais completa, como “abóbada fina de tijoleiras cerâmicas assentes ao baixo”, considerou-se no presente documento a popular designação de “abobadilha alentejana”.

4 Embora com menor divulgação, são conhecidos casos de utilização em diversos países da América Latina.

5 Entende-se por “empuxo” a força horizontal que a abóbada transmite a cada um dos seus apoios.

6 Para permitir a introdução de tensão inicial nos tirantes antes da execução da “abobadilha”, o apoio móvel encostava-se a dois batentes previamente montados que impediam o seu movimento para o interior.

7 O enchimento da “abobadilha” até uma altura de 2/3 da flecha é relativamente frequente em esteiras, isto é, tetos dos últimos pisos.

8 O carregamento do extradorso tem efeito estabilizador em arcos de perfil circular [22].

9 A posição mais desfavorável na aplicação de uma carga linear num arco ou numa abóbada cilíndrica é a, aproximadamente, 1/3 do vão [26].

10 O colapso de estruturas arqueadas ocorre quando a designada “linha de pressões” (linha de ação das resultantes das compressões nas seções transversais) toca os limites da seção transversal em quatro pontos (para mais informações sobre o comportamento estrutural de arcos consultar [26, 27, 28]).

REFERÊNCIAS

- [1] Addis, B. (2007) Building 3000 years of Design Engineering and Construction, Phaidon Press.
- [2] Fortea Luna, M (2008) Origen de la bóveda tabicada, Centro de Ofícios de Zafra.
- [3] Nicolás, L. (1639) Arte y uso de arquitectura. Juan Sánchez, Madrid.
- [4] Oliveira, V. (1757) Advertências aos modernos que aprendem o ofício de pedreiro e carpinteiro, Sylviana, Lisboa.
- [5] Guastavino, R. (1893) Essay on the theory and history of cohesive construction applied especially to the timber vault. 2nd ed. Ticknor and company, Boston.
- [6] Huerta, S. (2003) The mechanics of timber vaults: a historical outline, Essays on the History of Mechanics, pp. 89-134.
- [7] Fortea, M.; Bernal, V. (2001) Bóvedas de ladrillo: proceso constructivo y análisis estructural de bóvedas de arista, Editorial de los Ofícios S.L.
- [8] Martínez, E. (2013) La bóveda tabicada en España en el siglo XIX: la transformación de un sistema constructivo, Universidad Politécnica de Madrid, Tesis Doctoral.
- [9] Moya, L. (1947) Bóvedas tabicadas, Dirección General de Arquitectura, Madrid.
- [10] Truñó, A. (2004) Construcción de bóvedas tabicadas, Instituto Juan de Herrera, Madrid.
- [11] López, D. (2013) Structural analysis of tile vaults: methods and variables, Universidade do Minho, Master Thesis.
- [12] Santos, J. (2014) Estudo Construtivo e Estrutural de Abóbadas Alentejanas, Academia Militar & Instituto Superior Técnico Dissertação de mestrado.
- [13] Rei, J.; Gago, A.; Santos, J (2014) Abobadilha alentejana, uma técnica de construção imemorial. 5as Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas. Lisboa, pp. 1-16.
- [14] Rodrigues, M. (1954) Nota sobre estruturas de “abobadilha” de tijolo. Relatório Tirolino. LNEC.
- [15] Fidalgo, C. (1994) As abobadilhas alentejanas. 2.º Encore, LNEC.
- [16] Mateus, J. (2002) Técnicas tradicionais de construção de alvenarias. Livros Horizonte, Lda., pp. 94-95 e 135-136.
- [17] Gulli R.; Mochi G. (1995) Bóvedas tabicadas: architettura e costruzione, CDP, Roma.
- [18] Davis, L.; Rippmann, M; Pawlofsky, T., Block, P. (2012) Innovative funicular tile vaulting: A prototype vault in Switzerland. The structural engineer, pp. 46-56.
- [19] Dessi-Olive, J.; Krouwel, N.; West, M.; Ochsendorf, J. (2018) Tile vaulting with lightweight concrete and fiberglass spline formwork. Proc. of the IASS Symposium.
- [20] Ramage, M; Ochsendorf J.; Rich, P. (2009) Sustainable shells: New african vaults built with soil-cement tiles. Proc. of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium, pp. 1512-1520.
- [21] Block, P.; DeJong, M.; Ochsendorf, J. (2010) Tile vaulted systems for low-cost construction in Africa. ATDF Journal. 7 (1/2), pp. 4-13.
- [22] Gago, A.; Alfaite, J.; Lamas, A. (2011) The Effect of the Infill in Arched Structures: Analytical and Numerical Modelling, Engineering Structures, Volume 33, Issue 5, May 2011, pp. 1450-1458.
- [23] Cundall, P. (1971) A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. Symposium of the International Society of Rock Mechanics.
- [24] Itasca Consulting Group (2003) 3DEC – 3 Dimensional Distinct Element Code, User's Guide, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota.
- [25] Sarhosis, V.; Bagi, K.; Lemos, J.V.; Milani, G. (Eds) (2016) Computational modeling of masonry structures using the discrete element method, Advances in Civil and Industrial Engineering (ACIE) Book Series.
- [26] Gago, A. (2004) Análise Estrutural de Arcos, Abóbadas e Cúpulas - Contributo para o Estudo do Património Construído, Tese de Doutoramento, Instituto Superior Técnico, Lisboa.
- [27] Heyman, J. (1995) The stone skeleton, Cambridge University Press.
- [28] Roca, P.; Lourenço, P.; Gaetani, A. (2019) Historic Construction and Conservation: Materials, Systems and Damage, Routledge, New York.