

# Abobadilha Alentejana – Uma técnica construtiva tradicional

## Timbrel Vault – A traditional constructive technique

João Rei  
António Sousa Gago

### Resumo

A presente comunicação debruça-se sobre uma solução construtiva tradicional abobadada muito utilizada no Sul de Portugal, no Alentejo e Algarve, até meados do séc. XX, popularmente conhecida como Abobadilha Alentejana. Faz-se uma retrospectiva sobre a evolução da técnica, desde as suas origens até à atualidade, destacando a sua capacidade de adaptação ao longo dos séculos. São também descritas algumas regras de dimensionamento tradicionais, bem como os resultados de ensaios experimentais e numéricos realizados numa abobadilha alentejana submetida a carregamento uniforme e linear.

### Abstract

This paper focuses on a traditional vaulted constructive solution, known as timbrel vault, used in southern Portugal (Alentejo and Algarve) until the middle of the 20th century. The paper presents a retrospective of this vaulting technique, from its origins to present days, highlighting its adaptability throughout the centuries. Some traditional design rules are also described, as well as, results of experimental and numerical tests carried out on a timbrel vault submitted to uniform and linear loads.

**Palavras-chave:** Construção tradicional / Abóbadas de tijolo / Construção abobadada sem cimbra / Alvenaria / Análise estrutural / Ensaios experimentais

**Keywords:** Traditional construction / Brick vaulting / Construction without centering / Masonry / Structural Analysis / Experimental tests

## João Rei

Mestre/TCor Eng  
CINAMIL, Academia Militar  
Lisboa, Portugal  
jcmrei@gmail.com

## António Sousa Gago

Doutor/Professor  
CERIS, Instituto Superior Técnico  
Lisboa, Portugal  
antonio.gago@tecnico.ulisboa.pt

### Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

### Legal notice

*The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.*

REI, João [et al.] – Abobadilha Alentejana – Uma técnica construtiva tradicional. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 6. ISSN 2183-8488. (março 2018) 27-40.

## 1 Introdução

Uma parte importante do património arquitetónico do sul da Península Ibérica é constituída por edifícios tradicionais de alvenaria, com pavimentos e terraços feitos de abóbadas finas de tijolo [1]. Esta antiga técnica de abobadamento baseou-se no uso de regras empíricas de dimensionamento, transmitidas pelos mestres de geração em geração, a qual é importante recuperar e validar à luz dos conceitos atuais da mecânica estrutural. As abóbadas finas de tijolo são caracterizadas pelo assentamento dos tijolos ao baixo recorrendo a argamassa à base de gesso, ligante que lhe permite a dispensa de cimbramentos durante a execução [2].

Apesar de ser consensual que esta técnica, dotada dum alto grau de refinamento e complexidade, não pode ser o resultado de um processo de geração espontânea, mas sim resultado de uma evolução contínua ao longo do tempo, a origem das abóbadas finas de tijolo não é unânime. No entanto, é plausível aceitar que esta técnica construtiva foi desenvolvida para fazer face à escassez de recursos locais, nomeadamente de madeira (necessária para a execução dos cimbramentos) e de pedra. Por outro lado, é também óbvio que é fruto de um processo evolutivo contínuo partilhado por várias civilizações que o foram sucessivamente melhorando.

Trata-se duma técnica de construção disseminada pelos países da bacia do Mediterrâneo, onde recebeu diversas designações. Assim, é designada por *abobadilha alentejana* em Portugal, *bóveda tabicada* em Espanha ([3], [4], [5], [6], [7] e [8]), *voûte Roussillon* ou *voûte plate* em França ([9], [10] e [11]) e *volta in folio* ou *a la volterrana* em Itália ([12], [13] e [14]). Na sequência dos movimentos migratórios do século XIX e início do século XX, estas estruturas abobadadas propagaram-se pelo continente americano. Rafael Guastavino (1842-1908) construiu vários exemplares nos Estados Unidos da América, Rogelio Salmona (1929-2007) na Colômbia, Antonio Bonet (1913-89) na Argentina e no Uruguai e Eduardo Sacriste (1905-99) na Argentina. Exemplos de abóbadas finas de tijolo também podem ser encontrados na Ásia, nomeadamente na Índia [15] e, mais recentemente, na África Subsariana (África do Sul e Etiópia).

Independentemente da importância das abóbadas finas de tijolo na construção tradicional, particularmente na Península Ibérica, os estudos sobre esta técnica construtiva são relativamente raros. Em Espanha, alguns investigadores têm realizado estudos históricos e tipológicos sobre a *bóveda tabicada*, entre os quais se destacam os estudos de Araguas ([16], [17], [18] e [19]), Mochi [20], Collins [21], Fortea ([22] e [23]), Martínez [8] e Almagro ([24] e [25]). Há informação suficiente para pensar que, pelo menos no século IX, em Almeria, na Andaluzia, Espanha, já existia este tipo de abóbadas, no entanto, a primeira referência documental conhecida é o contrato celebrado com Joan Franch, em 1382, nas obras do mosteiro de Santo Domingo de Valência (Figura 1).

No entanto, devido à disseminação do aço estrutural e do betão armado, os construtores deixaram de usar esta técnica tradicional e, atualmente, são (muito) poucos os artífices que sabem como conceber este tipo de abóbadas e aplicar esta técnica [27]. Felizmente, devido a algumas obras recentes de preservação do património arquitetónico e à preocupação com a construção sustentável, o interesse por este tipo de construção renasceu.

Este artigo debruça-se sobre a descrição das características e evolução histórica desta técnica construtiva tradicional desde a sua origem até à atualidade e, também, a avaliação da sua resistência.



**Figura 1** Abóbada da capela dos Jofre no convento de Santo Domingo de Valência [26]

## 2 Evolução ao longo dos tempos

As primeiras aplicações conhecidas da técnica das abóbadas finas de tijolo ocorreram nas abóbadas de nervuras, no preenchimento do espaço entre as nervuras de pedra (Figura 1) [26]. Posteriormente, o uso de pedra nas nervuras foi, em determinadas situações, substituído por tijolos cerâmicos moldados (Figura 2), o que diminuiu significativamente o trabalho e os custos de construção.

Passo a passo, os construtores obtiveram confiança no uso de tijolos finos ao baixo em abóbadas e começaram a usar esta técnica em vãos maiores e a substituir as aduelas de pedra das nervuras por elementos cerâmicos (Figura 2). Assim, a evolução construtiva das abóbadas finas de tijolo no contexto do seu uso tradicional pôde-se observar, principalmente, em dois níveis: um, a dispensa gradual das nervuras e, outro, o modo de emprego do extradorso das abóbadas.

Relativamente às nervuras, a sua presença constituía uma ajuda importante na execução das abóbadas, já que permitia uma construção mais fácil dos panos. A abolição das nervuras implicou uma alteração dos procedimentos construtivos que levou os construtores do séc. XVII a aprimorar as técnicas construtivas.

Zaragoza [30] refere que a Idade Moderna é caracterizada pela eliminação progressiva das nervuras aparentes. No início do séc. XVI as abobadilhas alentejanas alcançaram um feito notável ao adotarem formas esféricas. Assim, deixaram de necessitar de nervuras, tornando-se independentes das abóbadas em cruzaria [31].

Em relação ao extradorso também se assistiu a uma evolução significativa ao longo dos tempos. Segundo Sánchez [32] nos exemplares valencianos do séc. XV, os cascos revestiam-se com enchimentos que incorporavam, opcionalmente, recipientes cerâmicos de aligeiramento. Contudo, Mochi [20] refere que durante o séc. XVI o enchimento das abóbadas vai perdendo lentamente a sua tradição funcional e que não há referência ao uso de recipientes cerâmicos para aligeirá-lo; no entanto Bassegoda Nonell [33] argumenta que esse enchimento é efetuado com alvenaria de tijolo e cal, abrangendo apenas os flancos das abóbadas.



(a)



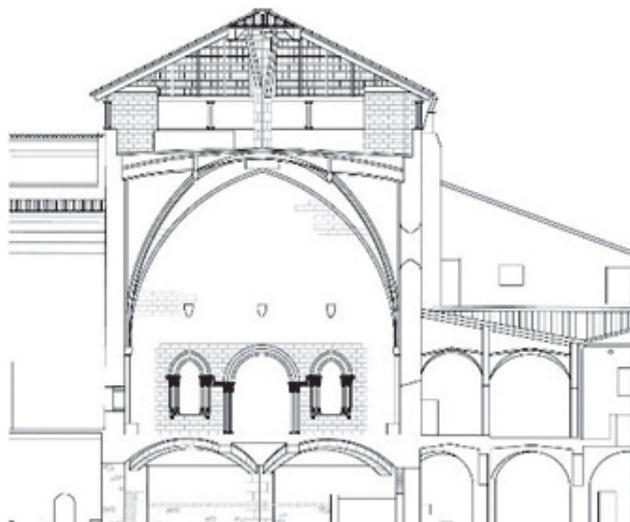
(b)

**Figura 2** Uso do tijolo e do gesso nas nervuras das abobadilhas: a) Tijolos moldados procedentes das igrejas de Torrelblanca (paróquia velha) e Traiguera (Santuário de Nossa Senhora da Fonte da Saúde), ambas em Castellón, Espanha [28]; b) Detalhe duma das chaves da capela de Santa Maria em Xàtiva, Espanha [29]

A partir do séc. XVI, grande número dos exemplares eram extradorsados com muretes devido às dificuldades que implicava a sua manutenção face à contínua aparição de fissuras e humidades. Assim, com o intuito de prevenir danos provocados pela humidade dos enchimentos nos frescos pintados nos intradorsos das abóbadas, em alguns documentos dos séc. XVII e XVIII, propõe-se o uso de muretes. Contudo, este sistema complementar de reforço e "estabilização geométrica" pelo extradorso não se encontrava ainda bem delineado até, pelo menos, o primeiro terço do séc. XVII [32].

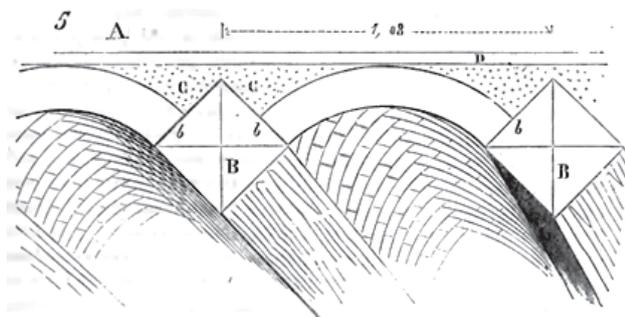
Um outro processo de "tratamento" do extradorso, quiçá mais engenhoso, constava no emprego de contra-abóbadas. O mestre

Abdiel Guillem utilizou-o na sala do capítulo do mosteiro de Pedralbes, na qual apoiou contra-abóvedas nuns muretes perfurados de tijolo que nasciam nas nervuras pétreas da abóbada gótica (Figura 3) [34].



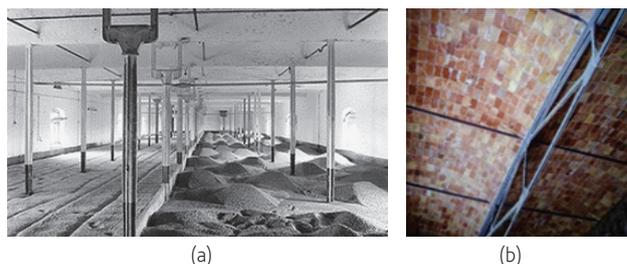
**Figura 3** Corte da sala do capítulo do Mosteiro de Santa Maria de Pedralbes, Barcelona (c. 1418-1419) [34]

Além da forma tradicional de utilização das abóbadas finas de tijolo, Viollet-le-Duc fez referência a uma outra e inovadora aplicação desta solução construtiva encontrada nos pisos dum edifício de Chartres do séc. XV, a qual consistia na colocação de barrotes de madeira paralelos uns aos outros, afastados entre três e seis pés, que suportavam uma plataforma superior composta por abobadilhas entretanto construídas entre eles (Figura 4) [35]. Pisos deste tipo são então relatados em vários edifícios na Flandres e no norte de França.



**Figura 4** Piso constituído por abobadilhas sobre barrotes de madeira em losango [36]

A variante construtiva da abobadilha alentejana foi, entretanto, usada com vigas metálicas na arquitetura industrial no séc. XVIII. Os primeiros exemplares foram construídos na Inglaterra, mas o seu emprego intensivo pôde observar-se por toda a Europa durante o séc. XIX (Figura 5). Muitos edifícios industriais dessa altura foram construídos com recurso a uma estrutura interna composta por pilares metálicos e pavimentos constituídos por abobadilhas apoiadas em vigas também metálicas (Figura 5).



**Figura 5** Aplicação da técnica no âmbito industrial: a) Primeiro exemplar, Flax Mill, Bage, Inglaterra, 1797 [37]; b) Fábrica Aslad, Clot del Moro, Espanha, Guastavino, 1901 [38]

Apesar da perda de protagonismo desta solução construtiva na segunda metade do séc. XIX, perante o aparecimento de novos materiais, alguns arquitetos ilustres destacaram-se na aplicação da técnica nos últimos anos desse século. Um deles foi Rafael Guastavino que, no final do séc. XIX partiu da Catalunha e cruzou o Atlântico com destino aos EUA, onde desenvolveu uma intensa atividade construtiva e de investigação centrada na *bóveda tabicada* (Figura 6).



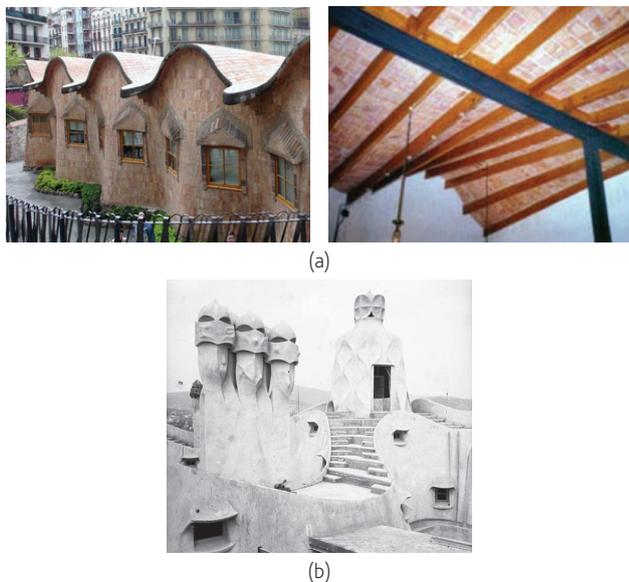
**Figura 6** Exemplos da atividade de Guastavino nos EUA: a) Abóbada fina de tijolo da estação de metro de City Hall, Nova Iorque, 1904 [39]; b) Patente de abóbada de apoio de escada, 1886 [40]

Gaudí, outro destacado arquiteto espanhol, apesar de não se ter notabilizado pela escrita sobre esta técnica, utilizou-a continuamente, tendo-lhe inculcido, inclusive, uma inovadora aplicação plástica escultórica (Figura 7) [35].

A acrescentar aos nomes de Guastavino e Gaudí há um número significativo de outros notáveis arquitetos espanhóis que contribuíram para o uso da técnica com novos materiais, maioritariamente vigas de aço, e dotaram-na de formas e aplicações inéditas até então.

São os casos, entre outros, de Domènech (1858-1917), Muncunill (1868-1931), Bayó (1873-1961), Guastavino Expósito (1873-1950), Cardellach (1875-1918), Martorell (1877-1951) e Terrades (1883-1950), e mais recentemente Buenaventura Bassegoda (1896-1987) e Luis Moya (1904-1990). Para além destes arquitetos, por outras paragens, outros, igualmente ilustres se afeiçoaram à técnica e a utilizaram com mestria como Corbusier (1887-1965) em França e na Índia, Bonet (1913-1989) e Dieste (1917-2000) no Uruguai, e Porro (1925-) em Cuba.

Ultimamente a técnica tem sido usada com sucesso em alguns países africanos, aliando o seu excelente desempenho e eficiência estruturais ao aproveitamento dos recursos locais, tanto materiais como humanos, uma vez que o baixo custo da mão de obra acrescenta viabilidade a este processo construtivo. Exemplos deste facto são os casos dos projetos de Mapungubwe National Park na África do Sul [42] e o Sustainable Urban Dwelling Unit (SUDU) na Etiópia [7] (Figura 8).

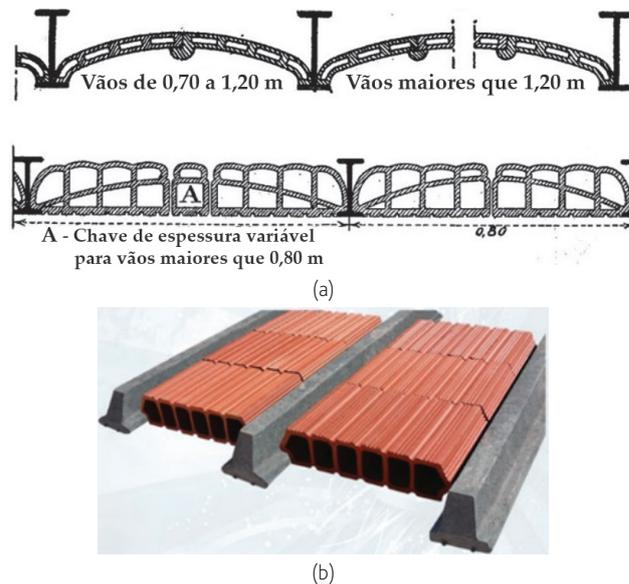


**Figura 7** Exemplos da aplicação da técnica por Gaudí: a) Escola provisória da Sagrada Família, Barcelona, 1909 [38]; b) Chaminés e saída de escada no terraço da Casa Milà, Barcelona, 1906-12 [41]



**Figura 8** Exemplos da aplicação recente da técnica: a) Mapungubwe National Park, África do Sul [42]; b) Sustainable Urban Dwelling Unit (SUDU), Etiópia [43]

Na sequência da revolução industrial e da debutante aparição de novos materiais, o uso deste tipo de abóbadas tornou-se menos generalizado. Contudo, a técnica reinventou-se e adaptou-se a novas configurações construtivas baseadas em vigas metálicas, que foram posteriormente aprimoradas e deram origem a uma solução de laje aligeirada, muito difundida hoje em dia (Figura 9).



**Figure 9** Reinvenção da técnica das abobadilhas alentejanas: a) Com vigas metálicas [44]; b) Com vigotas de betão pré-esforçado [45]

### 3 Regras empíricas de dimensionamento

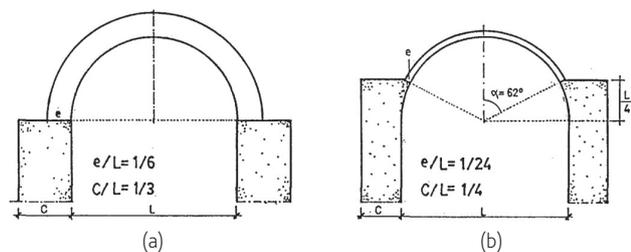
A literatura que aborda as abóbadas do tipo das abobadilhas alentejanas não é muito extensa, e a existente nem sempre é muito explícita. Grande parte dos tratadistas tem-nas contornado nas suas obras, seja por não serem consideradas de categoria suficiente no elenco do portefólio arquitetónico ou simplesmente por ignorância. O facto de não revelar um elemento distintivo, que se possa imediatamente identificar, dado que habitualmente as abobadilhas se encontram rebocadas, e, conseqüentemente, tornar a técnica invisível para quem a admira do intradorso, terá a sua influência. Por outro lado, os historiadores de arquitetura, duma forma geral, têm focado a sua atenção e análise naquilo que é superficial, no que lhes salta à vista, ou seja, na última camada do último material, em detrimento do que não se vê, como as fundações ou as “entranhas” dum edifício. Salvo raríssimas exceções, os livros de arquitetura, quando abordam elementos construtivos como as abóbadas e sobretudo quando estas se encontram revestidas, não se detêm a descrever a sua constituição interior, não relevam o material de que são feitas ou a técnica utilizada, sendo essas particularidades consideradas questões menores [46].

O primeiro tratado onde se abordaram as abobadilhas tipo alentejanas é obra de frei Lorenzo de San Nicolás (1593-1679), com o título *Tratado y uso de arquitectura* [3]. O facto de ser frade,

arquitecto e mestre-de-obras repercute-se na sua obra, uma vez que a mesma é escrita na perspectiva dum construtor de abóbadas, com uma abordagem consolidada pela própria experiência. O autor coloca as abobadilhas ao nível das abóbadas de tijolo e de cantaria e destaca a associação entre as primeiras e o gesso que era, na altura, o único ligante de presa rápida, imprescindível para este tipo de construção [1].

Assim, frei Lorenzo, para além de apresentar regras práticas relativas à execução das abobadilhas, com destaque para a evidente melhoria do seu comportamento mecânico em resultado do amaciamento dos rins até um terço da altura e do levantamento de muretes de tijolo pelo extradorso, até dois terços da altura, propõe também as primeiras regras empíricas de dimensionamento deste tipo de abóbadas.

De facto, os tratados de construção antigos recomendavam, para abóbadas de berço, que o enchimento do extradorso ou outras disposições equivalentes, como é o caso de muretes transversais espaçados, atingissem pelo menos 2/3 da altura da abóbada. Este artifício conduz a abóbadas abatidas abaixo de L/4 (considerando o vão entre os arranques desde o enchimento) de espessuras muito pequenas (Figura 10), tal como as abobadilhas alentejanas.



**Figura 10** Efeito da elevação dos pés-direitos até metade da flecha [47]

O dimensionamento dos pés-direitos revestiu-se, desde sempre, duma relevância extrema na construção abobadada. Na realidade, se se levantar um arco mal projetado, este ruirá no momento do descimbramento, mas poderá reconstruir-se, melhorando o seu perfil ou aumentando a sua espessura. No entanto, se os pés-direitos cederem toda a construção cairá por terra, ou ficará eternamente instável, pelo que o seu dimensionamento era de especial importância. Para tal, os mestres construtores utilizavam regras empíricas, geométricas na sua maior parte, mas também aritméticas.

A este respeito há que distinguir os pés-direitos simples dos compostos. Os simples, ao contrário dos compostos, não dispõem de contrafortes, o que lhes confere paramentos uniformes, de secção constante ou variável, ao invés dos pés-direitos compostos, nos quais os contrafortes se destacam da regularidade das paredes.

Dependendo da tipologia da superfície abobadada que suportam, os pés-direitos compostos podem acolher um impulso uniforme por unidade de comprimento (como no caso das abóbadas de berço seguidas), ou aquele pode estar concentrado em determinadas zonas específicas (como no caso das abóbadas de aresta). Independentemente dos casos, grande parte do empuxo total é contra-arrestado nas zonas contíguas aos contrafortes, dotadas de

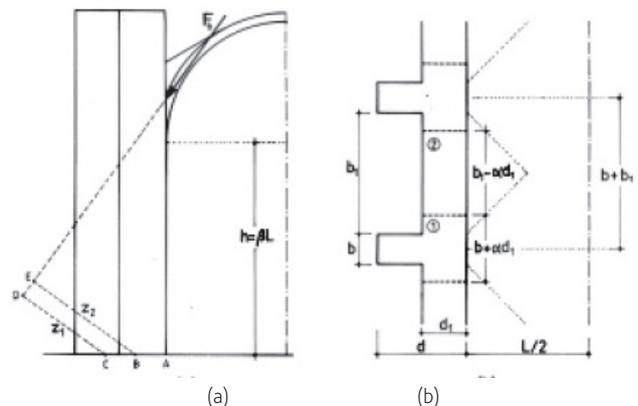
maior rigidez, que mediante a formação de arcos de descarga, no interior da parede, transmitem a carga uniforme aos contrafortes.

Frei Lorenzo apresentou um conjunto de regras empíricas para a conceção de pés-direitos (Quadro I), as quais foram posteriormente estudadas por Huerta (1955-) (Figura 11).

**Quadro I** Regras de frei Lorenzo para o dimensionamento dos pés-direitos de abóbadas de berço com lunetas em função do vão, L (adaptado de [3])

Tipo de pé-direito						
Tipo de abóbada	Material	Simples Parede Espessura	Composto			
			Parede Espessura	Contrafortes		
				Espessura	Largura	Espaçamento
Abóbada	Pedra	L/3	L/6	≥ L/3	L/9	L/2
	Tijolo	L/4	L/7	L/3	L/9	L/2
Abobadilha	Tijoleira	L/5	L/8	L/4	L/9	L/2

Nota: Consideraram-se proporções altura/largura da nave habituais em igrejas. Espessuras para o tipo de igreja duma nave com abóbada de canhão e lunetas, muito comum em Espanha no séc. XVIII [48].



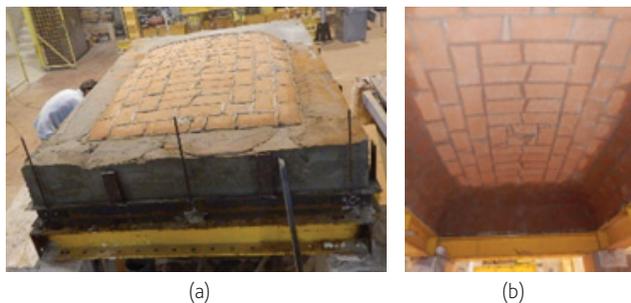
**Figura 11** Dimensionamento dum pé-direito composto segundo as regras de Frei Lorenzo [48]

## 4 Avaliação da resistência mecânica de abobadilhas alentejanas

A resistência desta solução construtiva tradicional ainda não é bem conhecida. Assim, desenvolveu-se um estudo [49] acerca da capacidade resistente e do comportamento estrutural das abobadilhas alentejanas, a versão portuguesa das abóbadas finas de tijolo. O estudo consistiu na simulação numérica, através de modelos de elementos discretos, do funcionamento mecânico de várias tipologias desta solução construtiva. Além disso, foi construído e posteriormente ensaiado um modelo à escala real duma abobadilha alentejana.

## 4.1 Modelo experimental

A construção do modelo físico (Figura 12) e o posterior ensaio de carga tiveram dois objetivos. Em primeiro lugar, tencionava-se registar a sequência construtiva e as técnicas que permitem a sua construção sem cimbra. Por outro lado, era importante avaliar a sua capacidade resistente e respetivo comportamento mecânico.



**Figura 12** Modelo físico de abobadilha de barrete de clérigo com enchimento lateral (área: 3,00 x 2,00 m<sup>2</sup>; flecha: 0,40 m): a) Vista do extradorso; b) Vista do intradorso

O modelo foi construído no Laboratório de Estruturas e de Resistência de Materiais (LERM) do Instituto Superior Técnico recorrendo a materiais (tijoleira cerâmica e argamassas de assentamento e de enchimento do extradorso) e a técnicas construtivas tradicionais.

As tijoleiras cerâmicas tinham dimensões de 300 x 150 x 35 mm<sup>3</sup> e os ensaios de caracterização mecânica, segundo a maior dimensão, indicaram uma resistência à compressão da ordem de 3,7 MPa.

As argamassas foram realizadas por métodos tradicionais. A argamassa de assentamento, composta por cimento e gesso, para garantir presa imediata, na dosagem (traço) de três partes de cimento por uma parte de gesso e a argamassa de enchimento constituída por areia ao traço de quatro partes de areia por uma de cimento.

Na execução da abóbada as juntas de argamassa foram executadas com a menor espessura possível, apenas o suficiente para garantir a ligação das tijoleiras (entre si) durante a construção da abóbada.

O processo construtivo (sem cimbra) assenta nas propriedades de presa rápida da argamassa de assentamento, na ligeira curvatura de cada fiada, tirando partido do efeito do arco e na sequência de execução, a qual é efetuada fiada a fiada a partir dos cantos, as quais se fecham no encontro das tijoleiras algures a meio das fiadas. Este processo repete-se a partir de cada uma das nascenças, originando uma espécie de anéis (fiadas completas em cada uma das direções) até ao fecho da abóbada.

De forma a tornar possível a construção da abóbada sem cimbra, de acordo com os métodos tradicionais, foi preciso efetuar, na fase inicial, um enchimento no extradorso da abóbada com pedaços de tijolo argamassados, o qual foi aplicado até uma altura de cerca de 2/3 da flecha pretendida para a abóbada (Figura 12 a). A execução dessa camada de enchimento implicou a instalação de painéis de cofragem no contorno da abóbada devidamente fixados, os quais foram removidos após a presa da argamassa de enchimento.

Submeteu-se o modelo físico a dois ensaios de carga com carregamento vertical: uma carga distribuída e uma carga

alinhada segundo um eixo linear (carga de faca ou linear). Testes subsequentes requeriam um novo exemplar, o qual não foi possível executar nesta fase da investigação. O carregamento foi efetuado através da colocação de lajetas de betão prefabricadas no extradorso (Figura 13). Um primeiro carregamento consistiu numa carga uniformemente distribuída sobre a abobadilha (Figura 13 a) e um segundo foi realizado através dum carregamento assimétrico, materializado por uma carga linear a um terço do vão (Figura 13 b). A seleção do posicionamento da carga neste último caso baseou-se na posição de carga mais desfavorável obtida nas simulações numéricas com modelos de elementos discretos.



(a)



(b)

**Figura 13** Ensaios efetuados sobre o modelo à escala real: a) Carga uniformemente distribuída; b) Carga linear

Com vista à materialização da carga através das lajetas de betão prefabricadas, foi necessário tornar a superfície do extradorso tão plana quanto possível. Para isso, foram colocados sacos de areia (Figura 14 a) e uma banda de argamassa (Figura 14 b) sobre o extradorso da abobadilha.



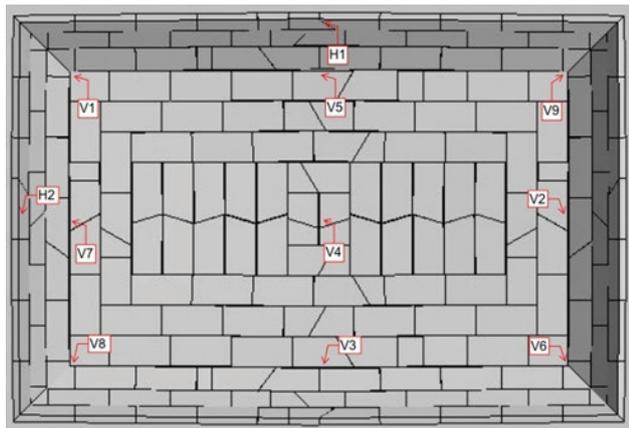
(a)



(b)

**Figura 14** Preparação do extradorso da abobadilha para a colocação das lajetas: a) Nivelamento do extradorso com sacos de areia para colocação da carga uniformemente distribuída; b) Banda de argamassa para colocação da carga linear

Na instrumentação da abobadilha, dispuseram-se onze transdutores em pontos estratégicos. Usaram-se nove transdutores para medição dos deslocamentos verticais e dois para medição dos deslocamentos horizontais (Figura 15).



**Figura 15** Posicionamento dos transdutores no intradorso da abobadilha

No primeiro ensaio (carga uniforme) foram colocadas quatro fiadas de lajetas, a que corresponde um valor de carga de aproximadamente 5 kN/m<sup>2</sup>. A carga resultante do peso próprio dos sacos de areia não foi considerada na quantificação do valor da carga referido. Não obstante, pode presumir-se que essa carga corresponda, aproximadamente, a 0,8 kN/m<sup>2</sup>. Por sua vez, cada fiada de lajetas corresponde a uma carga de 1,2 kN/m<sup>2</sup>.

A razão de ser para a não consideração do peso dos sacos de areia de nivelamento no valor da carga apresentado resulta do facto de se pretender estimar a capacidade de carga numa situação real, onde as abóbadas apresentam enchimento de regularização.

Os deslocamentos obtidos pelos transdutores estão indicados nos Quadros II a IV.

**Quadro II** Deformação da abobadilha com o carregamento – carga uniformemente distribuída

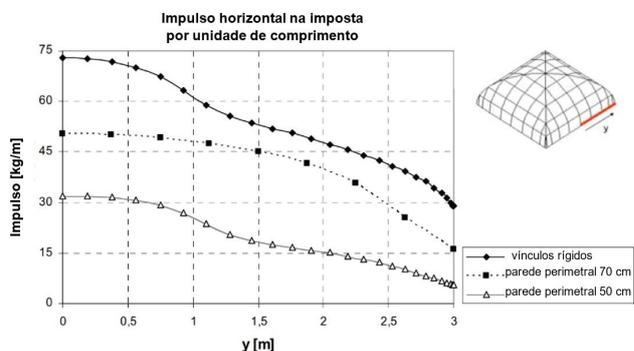
Fiadas	Transdutores/Deslocamentos (mm)										
	Verticais									Horizontais	
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	H1	H2
1.ª	-0,07	-0,02	-0,05	-1,49	0,00	-0,04	-0,08	-0,06	-0,03	0,00	-0,08
2.ª	-0,08	-0,02	-0,06	-2,62	0,00	-0,05	-0,10	-0,08	-0,04	0,02	-0,09
3.ª	-0,14	-0,05	-0,08	-4,38	-0,01	-0,09	-0,16	-0,12	-0,10	0,03	-0,13
4.ª	-0,18	-0,09	-0,05	-7,05	-0,03	-0,13	-0,23	-0,18	-0,16	0,04	-0,19

Nota: O sinal negativo indica um abatimento nos transdutores verticais e uma aproximação dos vãos correspondentes, no caso dos transdutores horizontais.

Como se constata do Quadro II, para uma carga distribuída de 5 kN/m<sup>2</sup> os deslocamentos medidos são pequenos na maioria dos transdutores, com exceção do localizado na zona da chave, onde

ocorre, para o maior valor da carga aplicada, um abatimento de 7 mm (transdutor V4). Relativamente aos deslocamentos horizontais nos apoios da abóbada ressalta-se que os valores obtidos variam ao longo dos bordos e resultam do incremento do impulso devido ao aumento do carregamento vertical.

É de notar que os deslocamentos horizontais nos apoios são dependentes das condições de fronteira (Figura 16), mas que na maioria dos casos as dimensões (espessuras) dos pés-direitos que suportam as abóbadas são suficientes para evitar a ocorrência de deslocamentos horizontais significativos. No modelo experimental procurou-se garantir condições de fronteira que não condicionassem o modo de colapso da abóbada, isto é, que apresentassem deslocamentos horizontais reduzidos. Para o efeito, foi construído um caixilho metálico constituído por perfis “I” que resultaram da junção de dois perfis UNP 140 sobre vigas em perfis HEA 220, com rigidez suficiente para prevenir deslocamentos significativos.



**Figura 16** Variação do impulso na imposta resultante do peso próprio duma abóbada de 6,00 × 6,00 m<sup>2</sup>, para diferentes condições de fronteira: vínculos rígidos e paredes perimetrais de 70 e 50 cm [50]

O Quadro III mostra a evolução da deformação durante a descarga da abóbada. Note-se que a descarga da abóbada ocorreu dezoito horas depois de concluído o carregamento, tendo-se verificado um aumento da deformação da abóbada durante esse período. Em consequência, a primeira linha do Quadro III é diferente da última linha do Quadro II.

Da comparação dos Quadros II e III pode observar-se que existe uma significativa deformação que deverá ser estudada em ensaios posteriores. Esta evolução pode dever-se à deformabilidade das juntas entre as tijoleiras, no processo de adaptação (e acomodação) da abóbada ao carregamento. A evolução patenteada nas primeiras dezoito horas pode não se verificar em períodos subsequentes. Este efeito ao longo do tempo deve ser corroborado em futuros programas de investigação tal como a origem da deformação residual que se identifica no Quadro III.

Finalmente, submeteu-se a abobadilha a uma carga linear numa extensão dum metro. Na Figura 14 b) mostra-se o processo de carregamento e a Figura 17 apresenta imagens da abóbada após o colapso.

No Quadro IV apresentam-se os deslocamentos registados durante o processo de carregamento e depois do colapso da abobadilha.

Ressalta-se que os deslocamentos na superfície do intradorso da abóbada foram registados indiretamente por um sistema de cabos e roldanas ligados a transdutores, o qual permitiu registar os deslocamentos antes, durante e após o colapso (nos pontos onde não ocorreu a queda de tijoleiras).

**Quadro III** Deformação da abobadilha com a descarga – carga uniformemente distribuída

Remoção	Trandutores/Deslocamentos (mm)											
	Verticais										Horizontais	
	V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	H1	H2	
Início	-0,21	-0,12	-0,10	-7,22	0,03	-0,18	-0,26	-0,22	-0,23	0,09	-0,24	
4ª fiada	-0,20	-0,16	-0,10	-6,28	0,05	-0,17	-0,27	-0,21	-0,23	0,09	-0,25	
3ª fiada	-0,18	-0,15	-0,10	-4,84	0,05	-0,14	-0,23	-0,18	-0,20	0,08	-0,24	
2ª fiada	-0,16	-0,13	-0,07	-3,68	0,06	-0,12	-0,18	-0,15	-0,16	0,33	-0,22	
1ª fiada	-0,12	-0,08	-0,05	-2,17	0,07	-0,08	-0,12	-0,10	-0,12	0,30	-0,21	
Sacos	-0,08	-0,04	0,01	-1,71	0,11	-0,04	-0,09	-0,06	-0,08	0,28	-0,18	

O colapso ocorreu após a colocação da 14.ª fiada, correspondendo a um valor de carga da ordem de 7,7 kN/m.



(a)



(b)

**Figura 17** Abobadilha após o colapso: a) Vista geral; b) Vista parcial

**Quadro IV** Deformação da abobadilha com o carregamento – carga linear

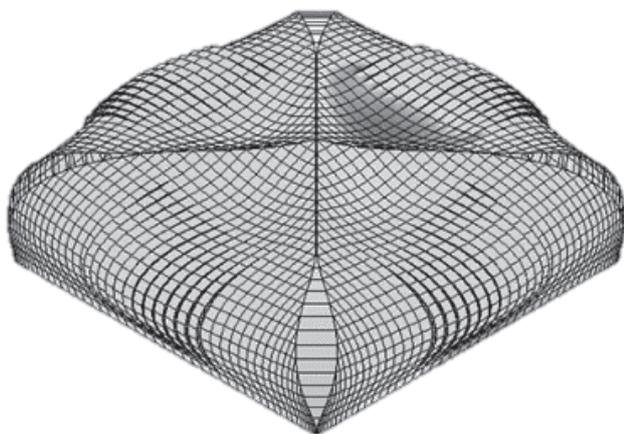
Instante	Tempo (s)	Transdutores/Deslocamentos (mm)											
		Verticais										Horizontais	
		V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	H1	H2	
Pré-colapso	t-1	-0,01	0,00	0,54	-4,42	0,37	-0,02	-0,03	-0,01	0,00	0,16	0,00	
Colapso	t	0,02	0,39	-1,34	-7,21	0,42	0,26	0,29	0,30	0,03	0,17	0,26	
Pós-colapso	t+1	0,10	3,55	-11,22	-8,30	1,34	1,74	2,40	1,72	0,08	0,18	1,27	
	t+2	0,16	7,25	-20,09	-1,27	2,72	3,89	4,83	3,59	0,12	0,20	2,13	

No Quadro IV constata-se que os deslocamentos registados nos transdutores V3 e V4, perto (por baixo) da linha onde a carga foi aplicada, apresentam valores significativos imediatamente antes do colapso.

A análise da fissuração da abobadilha após o colapso confirma o comportamento estrutural típico de superfícies de dupla curvatura. Ao tirar partido do efeito do arco nas duas direções perpendiculares, as tensões são encaminhadas para as vizinhanças das arestas, dotadas de maior rigidez. Como resultado, surgem fissuras ao longo destas linhas, tanto no intradorso como no extradorso (Figura 18), tal como defendido por Tomasoni [50], para o comportamento expectável deste tipo de abóbadas (Figura 19).



**Figura 18** Fissuração nas vizinhanças das arestas



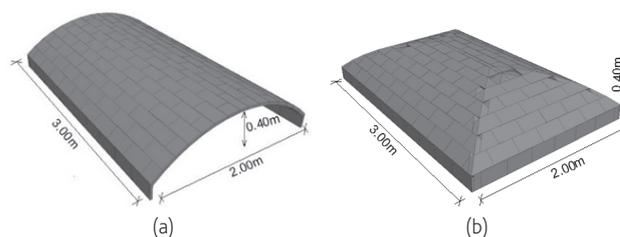
**Figura 19** Deformada de uma abóbada de barrete de clérigo sobre impostas rígidas (fator de escala  $10^5$ ) [50]

## 4.2 Modelos numéricos

Em virtude das características não lineares das estruturas de alvenaria decorrentes da sua muito fraca resistência à tração, da sua limitada resistência ao corte e da existência de descontinuidade entre elementos, a modelação do comportamento mecânico de estruturas de alvenaria é uma tarefa complexa. Existem algumas estratégias possíveis para a modelação desse comportamento não linear, sendo de destacar os modelos de elementos finitos de comportamento não linear e os modelos de elementos discretos. O método de elementos discretos apresenta como vantagens, face ao método de elementos finitos, a possibilidade de ocorrência de grandes deslocamentos e rotações entre os vários corpos (inclusive a sua separação) e o reconhecimento e atualização de novos contactos, com consequente eliminação de contactos obsoletos.

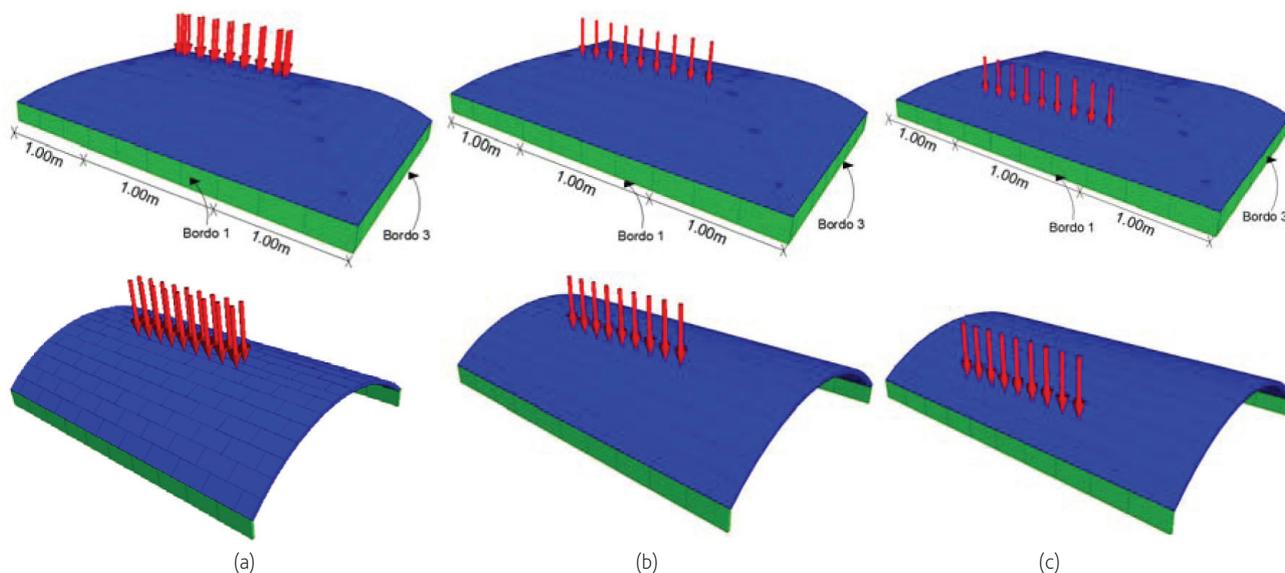
Este método torna-se, assim, especialmente indicado para o estudo das estruturas de alvenaria nas quais uma parcela significativa da deformação ocorre pelo movimento relativo entre os blocos. Do ponto de vista de eficiência numérica, o método dos elementos discretos, tratando-se dum método com solução explícita para a integração da equação de movimento dos graus de liberdade do modelo, apresenta algumas vantagens relativamente ao método dos elementos finitos, sendo essa a razão principal da sua utilização no âmbito deste trabalho, por intermédio do recurso ao programa de cálculo 3DEC (Three Dimensional Distinct Element Code), que se baseia numa das variantes deste método designada por método dos elementos distintos [2].

Assim, desenvolveram-se dois modelos computacionais de elementos discretos, correspondentes a uma abobadilha de berço ou cilíndrica e a uma abobadilha de barrete de clérigo ou de engras, com as mesmas dimensões do modelo experimental (Figura 20).



**Figura 20** Modelos de elementos discretos de abobadilhas alentejanas: a) De berço ou cilíndrica; b) De barrete de clérigo ou de engras [2]

As estruturas foram modeladas por intermédio do referido software de cálculo, considerando blocos rígidos ligados por contactos deformáveis. Esta opção justifica-se pelo facto de o comportamento das abobadilhas ser, em condições normais, condicionado pelo



**Figura 21** Posições e configurações das cargas: a) A meio vão ( $y = 0,000$ ); b) A 1/3 de vão ( $y = 0,358$ ); c) Junto ao bordo 1 ( $y = 0,781$ ) [2]

comportamento (resistência e deformabilidade) das juntas. A deformabilidade dos blocos (tijoleiras) é, em geral, menor que a deformabilidade das juntas e o colapso destas estruturas está, normalmente, associado à rutura das juntas entre blocos [2].

O modelo mecânico implementado para representar o comportamento físico das juntas consiste em admitir que, no contacto pontual, os blocos estão ligados através de molas nas direções normal e tangencial, sendo a variação das forças, normal e tangencial, proporcionais aos respetivos deslocamentos relativos do contacto. Para o efeito, consideraram-se constantes de proporcionalidade, constantes de rigidez normal e tangencial do contacto de 0,100 GPa/m [49].

As dimensões dos blocos nos modelos tridimensionais de elementos discretos correspondem às dimensões reais das tijoleiras, isto é,  $300 \times 150 \times 35 \text{ mm}^3$ , tendo-se considerado para a sua massa específica o valor de  $1680 \text{ kg/m}^3$ . Para as juntas entre blocos assumiu-se o modelo de comportamento ao corte de Mohr-Coulomb. Na direção normal aos contactos admitiu-se um comportamento elástico linear com uma resistência ilimitada à compressão e uma resistência à tração de 0,20 MPa. No modelo de corte considerou-se uma coesão de 0,20 MPa e um ângulo de atrito de  $35^\circ$ .

O objetivo da análise computacional era, em primeiro lugar, obter uma estimativa da resistência destes dois tipos de abobadilhas, comparando os valores das cargas de colapso para uma carga linear colocada ao centro numa extensão de um metro, tal como no modelo experimental, em três posições de carga distintas, a meio vão, a 1/3 do vão e junto do apoio e, em segundo lugar, estudar a distribuição dos impulsos ao longo dos bordos 1 e 3 da abobadilha de engras para as mesmas situações de carga, de modo a identificar as zonas de concentração de tensões (Figura 21).

Importa referir que nestes modelos não foram considerados os efeitos dum eventual enchimento do extradorso, o qual aumentaria, significativamente, a capacidade resistente. De facto, a existência desse enchimento do extradorso resulta numa maior compressão das aduelas (e, conseqüentemente, numa maior resistência ao corte), numa linha de pressões mais estável e restringe o deslocamento horizontal da abobadilha, fatores que aumentam significativamente a sua estabilidade. Para além disso, refira-se que a existência do enchimento e a propagação das cargas através dele resultaria em distribuições de ações mais uniformes, o que é favorável para o desempenho estrutural da abobadilha [2].

Os resultados destes modelos sintetizam-se nos gráficos das figuras seguintes. Na Figura 22 representa-se um gráfico onde se identificam os valores da carga de colapso em função do seu posicionamento. Neste gráfico, constata-se que, independentemente do seu posicionamento, a carga de colapso correspondente à abobadilha de engras é significativamente superior à carga de colapso correspondente à abobadilha cilíndrica. Por outro lado, em ambos os casos, verifica-se que a situação de carga mais gravosa corresponde a um carregamento próximo de 1/3 do vão ( $y = 0,358$ ) [2].

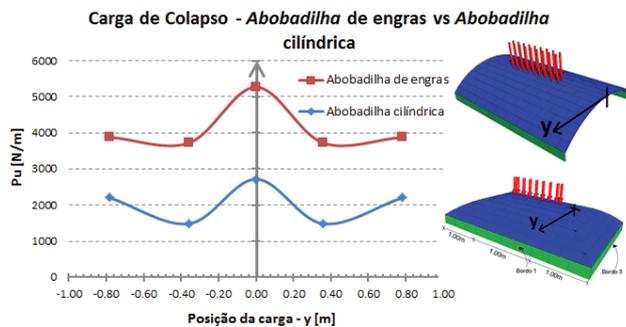


Figura 22 Carga de colapso para os dois modelos em função do posicionamento de carga [2]

Relativamente à distribuição de impulsos nos apoios da abobadilha de engras (Figura 23), observa-se uma diminuição junto das extremidades, evidente em todos os casos de carga, inclusive para o peso próprio. Estes resultados levam a concluir que não haverá concentração de impulsos nas extremidades das abobadilhas, isto é, junto das linhas de intersecção das superfícies curvas.

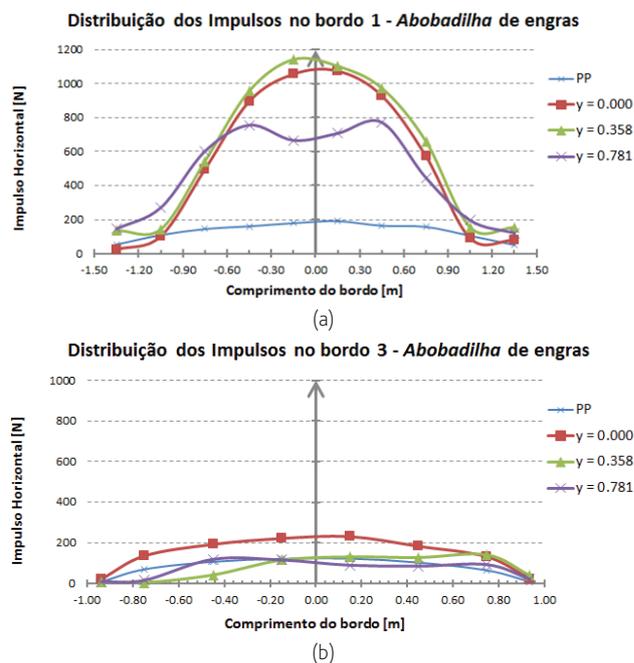


Figura 23 Distribuição dos impulsos na abobadilha de engras [2]: (a) Bordo paralelo à aplicação da carga; b) Bordo perpendicular à aplicação da carga

A distribuição dos impulsos na abobadilha cilíndrica é mais homogênea do que no caso anterior, embora exista um ligeiro aumento no centro do bordo (Figura 24)

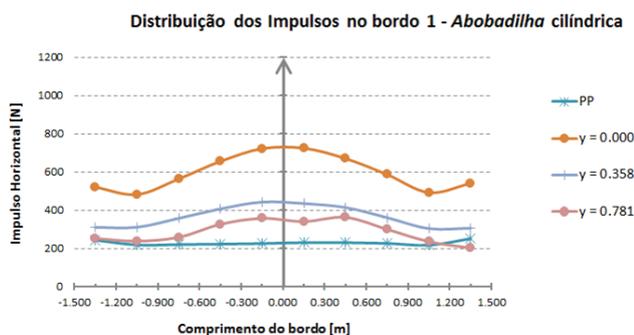


Figura 24 Distribuição dos impulsos na abobadilha cilíndrica [2]

## 5 Conclusões

A técnica construtiva abobadada de tijolo ao baixo, denominada em Portugal por abobadilha alentejana, encontra as suas raízes na mais remota Antiguidade e representa um avanço significativo na história da construção. Surge, como quase sempre acontece na história, dos ancestrais engenho, arte e capacidade do homem para adaptar as técnicas aos recursos disponíveis e resulta da evolução milenar que atravessou várias civilizações e geografias.

Mercê das suas inegáveis qualidades estruturais e arquitetónicas, e vantagens construtivas foi adotada por diversos arquitetos famosos que lhes proporcionaram um amplo reconhecimento e difusão generalizada.

Apesar de em Portugal se tratar duma técnica muito pouco estudada, trata-se duma solução construtiva com elevado potencial estrutural e arquitetónico, satisfazendo, simultaneamente, exigências de conforto e de sustentabilidade, como atestam vários estudos.

Urge, portanto, encará-la numa nova perspetiva, com vista à sua reutilização no âmbito de novos contextos construtivos, para além da sua natural aplicação na preservação do património arquitetónico.

Os ensaios recentemente realizados no Instituto Superior Técnico, descritos no presente artigo, constituem um primeiro impulso no sentido dum estudo mais aprofundado da versão portuguesa deste sistema tradicional de construção abobadada. Os resultados dos ensaios refletem a sua extraordinária capacidade resistente. O colapso ocorreu para uma situação de carga assimétrica (a situação de carga mais desfavorável), mas ainda assim de grande magnitude.

Apesar de algumas diferenças entre os modelos numéricos e experimental, como por exemplo o facto de não se ter considerado o enchimento nos primeiros ao invés do considerado no segundo, destaca-se a uniformidade global no que diz respeito aos resultados obtidos.

É imprescindível a continuação dos estudos agora apresentados e a realização doutros, com vista à definição de regras de dimensionamento e de estratégias de avaliação da resistência estrutural, não só com o intuito de estimar a segurança de construções existentes, mas também para proceder ao seu reforço e ao seu emprego em novas situações.

## Agradecimentos

Os autores agradecem os estudos desenvolvidos por Jorge Santos, os quais muito contribuíram para a investigação realizada pelos autores, resumida no presente trabalho. O apoio do CERIS – Civil Engineering Research and Innovation for Sustainability e da FCT – Fundação para a Ciência e a Tecnologia é também muito reconhecido pelos autores.

## Referências

- [1] Rei, J.C.M.; Gago, A.M.C.S. – “Abobadilha alentejana: Características e processos construtivos”, *2.º Congresso Internacional de História da Construção Luso-Brasileira*, Porto, Portugal, 2016, Vol. I, p. 91-105.
- [2] Rei, J.C.M.; Gago, A.M.C.S.; Santos, J.M.M. - “Abobadilha alentejana, uma técnica de construção imemorial”, *5.ªs Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, Lisboa, Portugal, 2014, p. 1-16.
- [3] Nicolás, L. – *Arte y uso de arquitectura*, Juan Sánchez, Madrid, 1639.
- [4] Moya, L. – *Bóvedas tabicadas*, Dirección General de Arquitectura, Madrid, 1947.
- [5] Fortea, M.; Bernal, V. – *Bóvedas de ladrillo: proceso constructivo y análisis estructural de bóvedas de arista*, Editorial de los Oficios S.L., 2001.
- [6] Truño, A. – *Construcción de bóvedas tabicadas*, Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2004.
- [7] López, D. – *Structural analysis of tile vaults: methods and variables*, Master Thesis, Universidade do Minho, Braga, 2013.
- [8] Martínez, E. – *La bóveda tabicada en España en el siglo XIX: la transformación de un sistema constructivo*, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, 2013.
- [9] Espie F. – *Manière de rendre toutes sortes d'édifices incombustibles ou Traité sur la Construction des Voutes, faites avec des briques et du plâtre*, Chez Duchesne, Paris, 1754.
- [10] Blondel, J.F.; Patte, P. – *Cours d'architecture civile*, Chez la Veuve Desaint, Paris, 1777.
- [11] Rondelet, J. – *Traité theorique et pratique de l'art du bâtir*, Chez M. A. Rondelet Fils, Paris, 1804.
- [12] Guarini, G.; – *Architettura civile*, Gianfresco Mairesse, Torino, 1737.
- [13] Valadier, G. – *L'architettura pratica dettata nella Scuola e Cattedra dell'insigne Accademia di S. Luca*, vol. IV, Roma, 1833.
- [14] Gulli, R.; Mochi G. – *Bóvedas tabicadas: architettura e costruzione*, CDP, Roma, 1995.
- [15] García, J.; González, M.; Losada, J.C. – “Arquitectura y construcción tabicada en torno a Eduardo Sacriste”, *Informes de la Construcción*, 2012, 64 (525), p. 35-50.
- [16] Araguas, P. – “L'église de san Martín de Belchite”, *Mélanges de la Casa de Velázquez*, 1986, 22, p. 85-109.
- [17] Araguas, P. – “L'acte de naissance de la Bóveda Tabicada ou le certificat de naturalisation de la «voûte catalane»”, *Bulletin Monumental*, 1998, 156 (2), p. 129-136.

- [18] Araguas, P. – “Voûte à la Roussillon”, *Butlletí de la Reial Acadèmia Catalana de Belles Arts de San Jordi*, 1999, 13, p. 173-185.
- [19] Araguas, P. – *Brique et architecture dans l’Espagne médiévale: Xlle-XVe siècle*, Casa Velásquez, Madrid, 2003.
- [20] Mochi, G. – “Elementos para una historia de la construcción tabicada”, *Las bóvedas de Guastavino en América*, Instituto Juan de Herrera, 1999, p. 113-146.
- [21] Collins, G. – “El paso de las cáscaras delgadas de fábrica desde España a América”, *Las bóvedas de Guastavino en América*, Instituto Juan de Herrera, 1999, p. 19-45.
- [22] Fortea, M. – *Origen de la bóveda tabicada*, Centro de Oficios de Zafra, Zafra, 2008.
- [23] Fortea, M. – “Origen de la bóveda tabicada”, *Actas del Sexto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Valencia, España, 2009, p. 491-500.
- [24] Almagro, A. – “Un aspecto constructivo de las bóvedas en Al-Andalus”, *Al-Qantara*, 2001, 22, p. 147-170.
- [25] Almagro, A. – “Bóvedas tabicadas en la Cartuja de Granada: el final de un proceso evolutivo”, *Construyendo Bóvedas Tabicadas, Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas*, Valencia, España, (26-28/05), 47-59, 2011.
- [26] Gómez-Ferrer, M. – “Las bóvedas tabicadas en la arquitectura valenciana”, *Construyendo Bóvedas Tabicadas, Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas*, Valencia, España, 2011, p. 61-80.
- [27] Rei, J.C.M.; Gago, A.M.C.S. – “Arcos e pés-direitos: Regras de dimensionamento na tratadística”, *2.º Congresso Internacional de História da Construção Luso-Brasileira*, 2016, Vol. I, Porto, Portugal, p. 107-119.
- [28] Zaragoza, A.; Bernad, F. – “Otros góticos: Bóvedas de crucería con nervios de ladrillo aplanillado y de yeso, nervios curvos, claves de bayoneta, plementerías tabicadas, cubiertas planas y cubiertas inclinadas”, *Historia de la ciudad, IV Memoria urbana*, CTAV, 2005, p. 70-88.
- [29] Sánchez, R. – “Bóvedas de crucería con nervios prefabricados de yeso y de ladrillo aplanillado”, *Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Santiago, España, 2011, p. 841-850.
- [30] Zaragoza, A. – “Hacia una historia de las bóvedas tabicadas”, *Construyendo Bóvedas Tabicadas, Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas*, Valencia, España, 2011, p. 11-45.
- [31] Zaragoza, A. – “A propósito de las bóvedas de crucería y otras bóvedas medievales”, *Anales de Historia del arte, Volumen Extraordinario*, Publicaciones Universidad Complutense de Madrid, 2009, p. 99-126.
- [32] Sánchez, R. – *Uso estructural de prefabricados de yeso en la arquitectura levantina de los siglos XV y XVI*, Tesis Doctoral, Universitat Politècnica de València, 2014.
- [33] Bassegoda Nonell, J. – *La cerámica popular en la arquitectura gótica*, Ediciones de Nuevo Arte Thor, Barcelona, 1983.
- [34] Conejo, A. – “«Volta de rajola», «volta de maó pla» o «volta catalana»: reflexiones en torno a las bóvedas tabicadas en Cataluña durante los siglos del gótico”, *Construyendo Bóvedas Tabicadas, Actas del Simposio Internacional sobre Bóvedas Tabicadas*, Valencia, España, (26-28/05), 109-125, 2011.
- [35] Lemma, M. – *Dei tetti ammattonati*, Il Cardo Editore S.R.L., Venezia, 1996.
- [36] Viollet-le-Duc E. – *Dictionnaire raisonné de l’architecture française du XIe au XVIe siècle*, B. Bance, Paris, 1858.
- [37] <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=33>.
- [38] Gobbo, A. – *Volte in ferro e laterizio all’inizio del XX secolo – Tecnica costruttiva, casi di studio, diagnose e conservazione*, Dottorato di Ricerca, Politecnico de Milano, 2011.
- [39] Ochsendorf, J. – *Las bóvedas de Guastavino – El arte de la rasilla estructural*, Papersdoc, Ajuntament de Barcelona, 2014.
- [40] [http://web.mit.edu/cron/Backup/project/guastavino/www/resources/resources\\_pat\\_ents.htm#](http://web.mit.edu/cron/Backup/project/guastavino/www/resources/resources_pat_ents.htm#).
- [41] Bassegoda Nonell, J. – “La construcción tradicional en la arquitectura de Gaudí”, *Informes de la Construcción*, 1990, 42 (408), p. 9-14.
- [42] Ramage, M.; Ochsendorf, J.; Rich, P. – “Sustainable Shells: New African vaults built with soil-cement tiles”, *Proceedings of the International Association for Shell and Spatial Structures (IASS) Symposium*, Valencia, España, 2009.
- [43] Block, P.; Dejong, M.; Lara, D.; Ochsendorf, J. – “Tile vaulted systems for low-cost construction in Africa”, *ATDF Journal*, 2010, 7 (1/2), p. 4-13.
- [44] Barberot, E. – *Tratado práctico de edificación*, Gustavo Gili, Barcelona, 1927.
- [45] <http://montecarlopremolados.com.br/produto/vigotas-de-concreto-ate-369m/>.
- [46] Fortea, M.; Bernal, V. – “Bóvedas tabicadas: Mitos”, *Actas del Quinto Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Burgos, España, 2007, p. 315-323.
- [47] Huerta, S. – *Diseño estructural de arcos, bóvedas y cúpulas en España, ca. 1500 – ca.1800*, Tesis doctoral, Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 1990.
- [48] Huerta, S. – *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*, Instituto Juan de Herrera, Madrid, 2004.
- [49] Santos, J.M.M. – *Estudo Construtivo e Estrutural de Abobadas Alentejanas*, Dissertação de mestrado, Academia Militar e Instituto Superior Técnico, 2014.
- [50] Tomasoni, E. – *Le volte in muratura negli edifici storici: technique costruttive e comportamento strutturale*, Dottorato di Ricerca, Università degli Studi di Trento, 2008.
- [51] Huerta, S. – “The mechanics of timber vaults: a historical outline”, *Essays on the History of Mechanics*, 2003, p. 89-134.

