

A FORMA NA CONSTRUÇÃO ABOBADADA

João Rei ^{a1}, António S. Gago ^b

^a CINAMIL - Centro de Investigação da Academia Militar, 1169-203 Lisboa, Portugal.

^b Civil Engineering Research Innovation for Sustainability, Instituto Superior Técnico, Avenida Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, Portugal.

ABSTRACT

This paper focuses on the form in the context of traditional vaulted building. It concerns to a dual approach to the form that is considered, on the one hand, as a result of various constraints that influence it upstream, as the characteristics of the materials, the nature and magnitude of the loads and the laws of nature that rules their behavior and, on the other hand, it is expounded the structural consequences and aesthetic influences that result from adopting a certain form. It is presented a brief retrospective of the evolution of the characteristics of the buildings over time and it is related these characteristics to the forms taken by the various civilizations that, according to the mastery of construction techniques available.

The form is arised in a less known perspective, its mechanical view. In fact, the adoption of a particular form is closely related to the mechanical performance behind it, whereby it is referred some aspects according to this point of view. Finally, it is approached the timeless interdependence between structural performance and architectural elegance and the important role that form can play in this longed-for harmony between aesthetics and mechanics.

Keywords: Construction, Masonry, Arch, Vault, Form.

RESUMO

O presente artigo debruça-se sobre a forma no âmbito da construção tradicional abobadada. Trata-se duma abordagem dual da forma, isto é, considerada-a, por um lado, como um resultado de vários condicionalismos que a influenciam a montante, como as características dos materiais, natureza e magnitude das cargas e as leis da natureza que regem o seu comportamento e, por outro, explanam-se as consequências estruturais e as influências estéticas que resultam da adoção de determinada forma.

¹ Email para contacto: jcmrei@gmail.com

Apresenta-se uma retrospectiva sumária da evolução das características das construções ao longo dos tempos e relacionam-se essas características com as formas adotadas pelas várias civilizações, de acordo com o domínio das técnicas construtivas disponíveis.

Aflora-se a forma numa perspectiva muitas vezes subalternizada, a sua vertente mecânica. Na verdade, a adoção de determinada forma está intimamente relacionada com o desempenho mecânico que lhe está subjacente, pelo que se referem alguns aspetos segundo este ponto de vista.

Finalmente, aborda-se a interdependência intemporal entre desempenho estrutural e elegância arquitetónica e o importante papel que a forma pode desempenhar nesta almejada harmonia entre estética e mecânica.

Palavras-chave: Construção, Alvenaria, Arco, Abóbada, Forma.

1. INTRODUÇÃO

O estabelecimento da agricultura e a conseqüente adoção dum estilo de vida sedentário, levou o homem a procurar construções mais sólidas e duráveis. Foi através da observação da natureza que esta suscitou no homem a ideia da abóbada. As grutas e as cavernas foram utilizadas como o seu primeiro abrigo e desencadearam nele o desejo de imitá-las nas suas primeiras construções. Este facto a par do advento e o incremento do uso da pedra, demonstram como o meio e os recursos que disponibiliza, tem condicionado e caracterizado a arquitetura desde as suas origens.

A cobertura dos espaços ou a superação dos vãos constitui, desde a antiguidade, um dos maiores desafios ao engenho e à capacidade criativa do homem e este cedo constatou que modelando as estruturas com uma forma adequada poderia, não só, alcançar esse objetivo, mas tornava possível fazê-lo sobre vãos de cada vez maiores dimensões.

2. A CONSTRUÇÃO ABOBADADA

2.1 INTRODUÇÃO

A construção abobadada abrange uma parte significativa da história da construção e resulta da evolução dum longo processo construtivo baseado na aplicação de regras empíricas de dimensionamento, recorrendo a um procedimento de tentativa e erro, sucessivamente refinado por muitas gerações de arquitetos e artifices de várias civilizações, ao longo dos últimos milénios.

Em todo o caso, não se trata dum processo que resulta da contribuição de intervenientes isolados individualmente, mas dum sistema organizado em que cada geração se baseia nos feitos dos seus antecessores, através do qual o conhecimento, o engenho e a arte são alcançados cumulativamente. Cada novo interveniente partia do nível alcançado através do esforço coletivo de todos aqueles que edificaram antes dele. Não tinha que se preocupar com as falhas, os desmoronamentos, os esforços rejeitados dos artífices anteriores, uma vez que sabia como evitar esses erros. Embora o génio dos maiores cientistas possa revolucionar a sua área de estudo, deve também desenvolver a sua atividade sobre o que já foi feito. A esse respeito, Newton observou que se ele pôde ver mais longe, foi porque esteve aos ombros de gigantes. A definição da melhor geratriz a dar aos arcos e abóbadas foi, desde sempre, uma das questões mais pertinentes da arquitetura e despertou o interesse, não só de artífices e mestres construtores, mas também de matemáticos e físicos de renome ao longo dos tempos.

Contudo, a forma das estruturas deve respeitar uma série de condicionalismos, como é o caso das leis da natureza, para além da adequada consideração das propriedades mecânicas dos materiais. Uma das leis cruciais na conceção da forma estrutural é a lei da gravidade, cuja primazia faz naturalmente a distinção entre a estabilidade e a ruína das estruturas. Por outro lado, o reconhecimento das propriedades mecânicas dos materiais permite a sua utilização explorando as suas virtudes e acautelando as suas fraquezas. Os antigos mestres construtores aprenderam desde muito cedo, nas suas construções, a tirar partido quer da força da gravidade, quer das características dos materiais de que dispunham. Mais a jusante, a forma pode também ser abordada segundo uma dupla e indissociável valência estética ou arquitetónica versus mecânica ou estrutural. De facto, grande parte dos edifícios que constituem o valiosíssimo património arquitetónico que nos foi legado pelos nossos antepassados não manifestam, à primeira vista, o desempenho estrutural naturalmente oculto pela estética e elegância dalguns elementos construtivos.

2.2 PRIMÓRDIOS

Ao longo da história da construção, nem sempre o homem tirou partido da forma, sob uma perspetiva estrutural, para satisfazer a necessidade de cobertura dos espaços. Assim, segundo Samuel Ware (1781-1860), 1822, nem os egípcios nem os gregos fizeram uso do arco ou da abóbada de aduelas. Este conhecimento, desenvolvido em grande medida para tornar as limitações dos materiais, não era necessário, enquanto dispusessem das

pedras que usavam e fossem capazes de erguê-las, independentemente das suas dimensões. Os seus tetos eram formados por pedras dum tamanho extraordinário, cada uma cobrindo todo o comprimento duma parede à outra, como lintéis, ou com cachorros em forma de degraus duma escadaria de pedra. Assim, desde que houvesse disponibilidade de meios para cobrir um espaço com uma única pedra para quê empregar um cento?

Segundo Vitruvius (séc. I A.C.) inicialmente, em edifícios largos, dispunham-se suportes para apoiar as cumeeiras dos telhados, designados por colunas, delimitando-se, assim, o vão a metade da largura.

As construções abobadadas são muito antigas e terão tido a sua origem no denominado “falso” arco, pseudo-arco, arco em consola ou arco maia construído por intermédio da sobreposição de pedras em fiadas horizontais deslocadas umas em relação às outras, também designado por processo construtivo de arcos e abóbadas por fiadas avançadas, cuja invenção, segundo Huerta (2001), terá ocorrido na Mesopotâmia ou no Egito há cerca de 6000 anos (Figura 2.1).



(a)



(b)

Figura 2.1 - Arcos falsos: (a) Zona arqueológica de Bécan, Campeche, México (<https://www.flickr.com>); (b) Túmulo de Nasir ud din Mahmud, Ghori, Nova Deli, Índia, 1231 d.C. (<https://pbs.twimg.com>)

De facto, podem encontrar-se nessas regiões exemplos primitivos de arcos, abóbadas e cúpulas datadas do III milénio a.C., construídos com recurso a esse sistema (Figura 2.2).



Figura 2.2 - Construção de abóbadas por fiadas avançadas, Palácio de Mari, Mesopotâmia, Séc. XXI a.C. (Churtichaga, 2001)

Dado o paralelismo do processo construtivo entre estas construções e os falsos arcos, à semelhança destes, estas coberturas são designadas de “falsas” abóbadas e “falsas” cúpulas, pelo que a palavra “abóbada” nem sempre se refere ao modo de construção por aduelas, que hoje conhecemos.

Segundo Elide Tomasoni, 2008, estas coberturas baseiam-se no sistema trilítico² e são constituídas por pedras sobrepostas colocadas progressivamente com uma ligeira saliência que converge no topo, o qual é fechado com uma pedra ou um lintel de pequenas dimensões. A partir do II milénio a.C. esta técnica construtiva foi utilizada difusamente na arquitetura micénica e em outras civilizações do Mediterrâneo (Figura 2.3).

² Sistema de construção definido por pilares verticais, unidos por lintéis (arquitraves) horizontais. O significado de trilítico advém da junção de duas palavras: tri (três) e lithos (pedras).

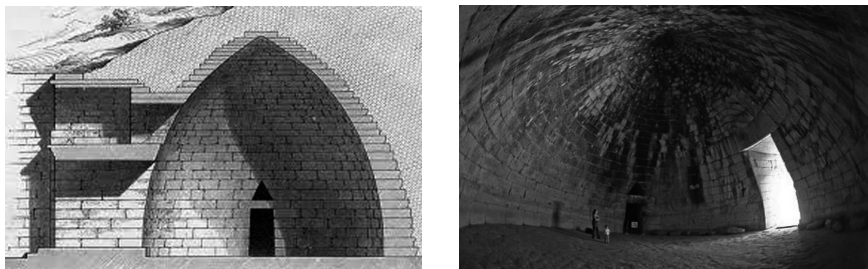


Figura 2.3 - Tesouro de Atreu, Micenas, Séc. XIV a.C. (a) Corte (<http://image.slidesharecdn.com>); (b) Vista do interior (<https://pt.advisor.travel>)

Uma outra técnica construtiva difundida sobretudo na Mesopotâmia, na Assíria, no Egito e sucessivamente no Oriente Bizantino há cerca de 5000 anos, consiste na construção de abóbadas, na variante de berço, recorrendo à técnica dos leitos inclinados³. Através desta técnica era possível executar abóbadas sem cimbra, uma vez que o primeiro arco se apoia na parede de testa do vão a cobrir e cada arco sucessivo se apoia no precedente (Figura. 2.4).

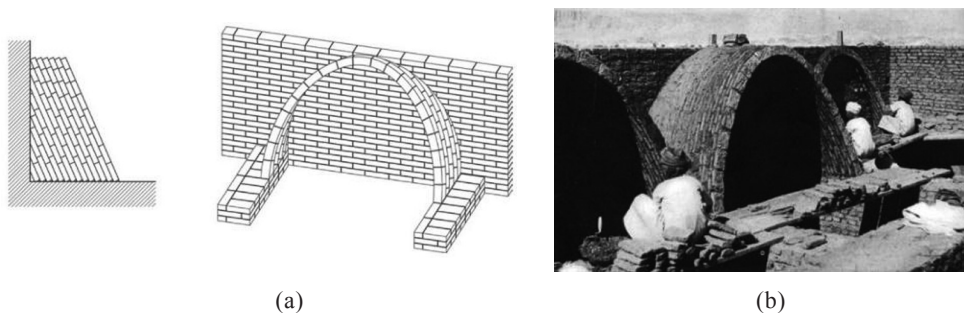


Figura 2.4 - Técnica dos leitos inclinados: (a) Esquema construtivo (Tomasoni, 2015); (b) Aplicação: construção de abóbadas núbias (H. Fathy, 1973)

³ A técnica dos leitos inclinados consiste em executar uma abóbada com fiadas autoportantes, estáveis através da sua forma, gerando arcos. O assentamento de cada nova fiada é assegurado pela aderência da argamassa até estar fechada; uma vez completa a fiada, a sua estabilidade decorre da sua forma em arco servindo de base às unidades da fiada seguinte a ser assente sobre ela.

Um exemplo da aplicação desta técnica, datado do séc. XIII a.C. é o Ramesseum, templo funerário de Ramsés II (Figura 2.5).



Figura 2.5 - *Ramesseum*, Tebas (cidade do antigo Egito), séc. XIII a.C. (<http://www.josellull.com>)

Posteriormente, povos como os Sasánidas da Pérsia desenvolveram estas técnicas significativamente a partir do séc. II D.C., chegando a cobrir sem recurso a cimbres, enormes complexos espaços abobadados como o palácio de Ctesifonte (Figura 2.6).



Figura 2.6 - Palácio de Ctesifonte, Mesopotâmia, séc. III d.C. (<http://chrismielost.blogspot.pt>)

Segundo alguns autores o arco “verdadeiro” poderá ter surgido acidentalmente, como por exemplo na sequência da queda de pedras dum arco falso para o seu interior, cunhando-se umas às outras (Figura 2.7 a), ou quando pedras de menores dimensões, em forma de cunha, foram colocadas em nichos reduzidos

no espaço superior central entre pedras maiores (Figura. 2.7 b), ou ainda, com o intuito de diminuir o comprimento da pedra que vencia o vão (Figura 2.7 c).

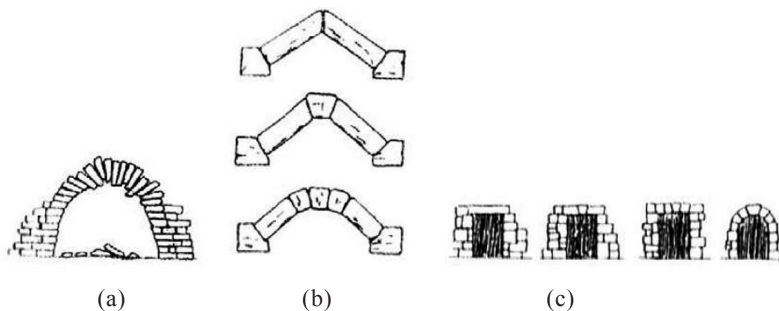


Figura 2.8 - Hipóteses para o desenvolvimento inicial do arco: (a) Arco com mísulas; (b) Sistema tri-rotulado; (c) Do lintel ao arco de alvenaria (Kurrer, 2008, modificado)

De acordo com Samuel Ware, 1822, o método da abóbada por aduelas deveria ser conhecido tanto pelos romanos, como pelos gregos, antes da primeira guerra púnica (264 a 241 a.C.). No entanto, os romanos foram lentos a trocar o pórtico pela arcada e em subordinar a coluna ao arco: eles mantiveram-na como um ornamento, onde deixou de se tornar útil. A adoção da forma curva na construção terá também sido influenciada pela observação da natureza, nomeadamente de arcos naturais (Figura 2.9) e de cavernas e grutas, como referido.



Figura 2.9 - Exemplos de arcos naturais: (a) Landscape Arch (<http://www.flickr.com>); (b) Arco Aloba, Chade (<http://www.naturalarches.org>)

De facto, são vários os exemplos da aplicação pelo homem de estruturas encontradas na natureza: a ponte feita duma árvore caída (Figura 2.10 a);

a ponte em arco em resultado da erosão de rochas (Figura 2.10 b); a ponte suspensa por diversos tipos de trepadeiras (Figura 2.10 c). Estes três tipos de princípios estruturais mantiveram-se inalterados até à atualidade.

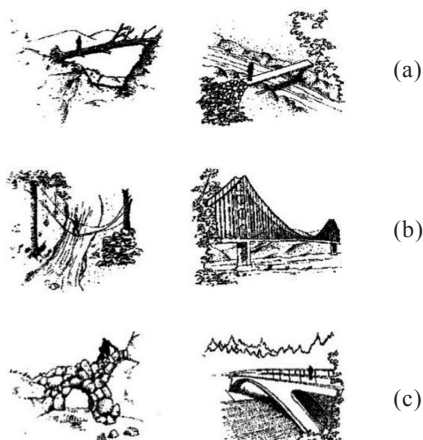


Figura 2.10 - Os três tipos de princípios estruturais encontrados na natureza e a sua aplicação em estruturas construídas pelo homem (Senosian, 2003)

2.3 TIPOS DE ABÓBADAS

Segundo Tomasoni (2008), a escolha da abóbada a adotar sobre um espaço depende da geometria da área a cobrir, do tipo dos apoios e da flecha máxima disponível. A forma mais comum das plantas a voltar é a quadrada ou retangular, às quais se adequam as abóbadas de berço (Figura 2.11 a), de berço com lunetas (Figura 2.11 b), de berço com testa de barrete de clérigo (Figura 2.12 a), de barrete de clérigo (Figura 2.12 b) em cruzaria (Figura 2.13 a) e à vela (Figura 2.13 b).

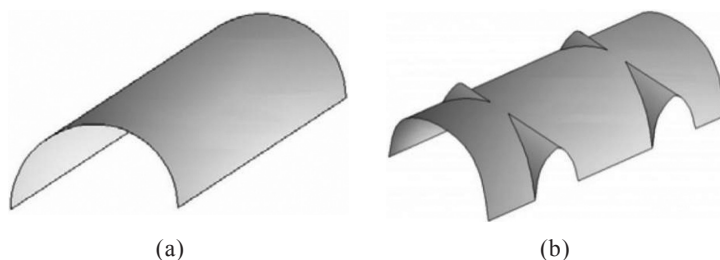


Figura 2.11 - Tipos de abóbadas de curvatura simples: (a) Abóbada de berço; (b) Abóbada de berço com lunetas (Tomasoni, 2008)

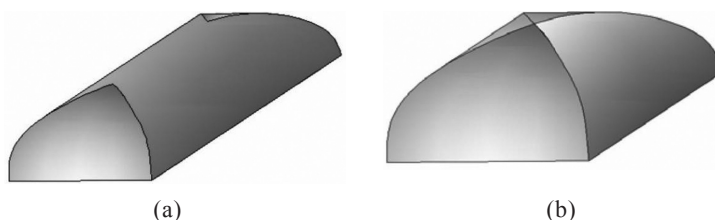


Figura 2.12 - Tipos de abóbadas de dupla curvatura: (a) Abóbada de barrete de berço com testa de barrete de clérigo; (b) Abóbada de barrete de clérigo (Tomasoni, 2008)

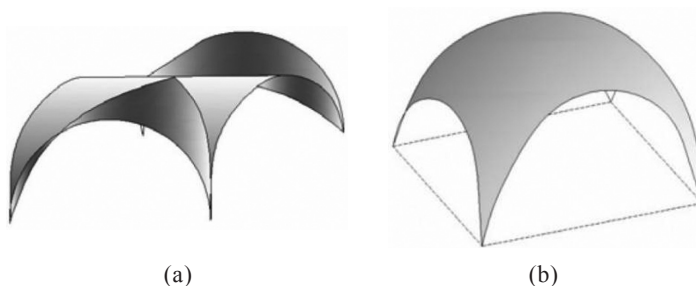


Figura 2.13 - Tipos de abóbadas de dupla curvatura: (a) Abóbada de arestas; (b) Abóbada à vela (Tomasoni, 2008)

Estas são, evidentemente, as mais comuns, citadas na maioria dos tratados, no entanto, existem outros tipos de abóbadas.

Deve notar-se que, subjacente à forma de cada um dos tipos de abóbada, está o seu desempenho mecânico, assim, as abóbadas de curvatura simples descarregam as cargas apenas numa direção e de forma linear, ao contrário das abóbadas de dupla curvatura que descarregam as cargas em duas direções perpendiculares de forma linear (Figura 2.12) ou pontual (Figura 2.13). Estas diferenças de comportamento estrutural têm repercussões importantes na arquitetura dos espaços. As abóbadas cuja descarga de cargas é linear, implicam a existência de pés-direitos (paredes) contínuos nos seus contornos, dois no caso de curvatura simples (Figura 2.14 a) e quatro, quando se trata de dupla curvatura, enquanto as abóbadas de descarga pontual necessitam apenas de apoios localizados (pilares/colunas) (Figura 2.14 b), pelo que, ao dispensarem a existência de paredes no contorno, permitem maior liberdade arquitetónica e a obtenção de espaços mais amplos.

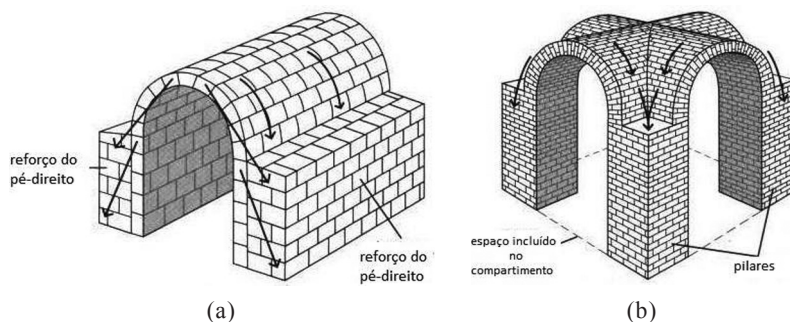


Figura 2.14 - Encaminhamento de cargas em abóbadas: (a) Abóbada de berço; (b) Abóbada de aresta (<http://www.oocities.org>) modificado

2.4 MECÂNICA DA FORMA

2.4.1 Forma Ideal

Para perceber a história da estabilidade das abóbadas e, mais precisamente, da melhor forma a dar a um arco, é essencial saber que ao estudar esta matéria, está-se a lidar com a história das técnicas e com o conhecimento empírico existente desde a antiguidade, em várias civilizações. A percepção da forma mais adequada dum arco nem sempre foi consensual e foi sendo alterada ao longo do tempo. Assim, alguns tratadistas, entre os quais Leon Alberti (1404-1472), defendiam que o arco mais estável e resistente era o arco de volta inteira, forma considerada ideal, em geral, até ao séc. XVIII. Um arco que se revelou polémico quanto à forma, foi o arco gótico ou ogival, em torno do qual foram esgrimidos argumentos contraditórios por diversos autores, alguns enaltecendo as suas virtudes e outros apontando os seus defeitos. Segundo Alfred Bartholomew (1801-1845), 1840, os arcos góticos incorporam algumas vantagens económicas e mecânicas comparativamente a outros arcos, como sejam resistência e leveza utilizando uma menor quantidade de material, além de, ao tirarem partido da forma apontada, gerarem menores empuxos sobre os pés-direitos, mas padecem do defeito de, dada a elevada inclinação do seu perfil, tendencialmente favorecerem o deslizamento do material de enchimento que frequentemente é colocado no extradorso. Por outro lado, Ware, 1822, refere ser o arco gótico o mais imperfeito de todos, de acordo com os resultados de estudos duma série de matemáticos acreditados e revela a união dalguns tratadistas de renome no descrédito destes arcos, com vista a bani-los da construção de edifícios.

No entanto, a teorização do arco sustentada pelo avanço da matemática a partir do final do séc. XVII, despertou a curiosidade e o interesse, não só cientistas de renome, como Robert Hooke (1635-1703), mas também de matemáticos ilustres como Philippe de La Hire (1640-1718), Jacob Bernoulli (1654-1705) ou David Gregory (1659-1708), cujos estudos baseados na analogia entre a abóbada e a catenária, forma adotada por uma corrente livremente suspensa nas suas extremidades sob a ação da gravidade, apontaram esta como a forma mais adequada (Figura 2.15).

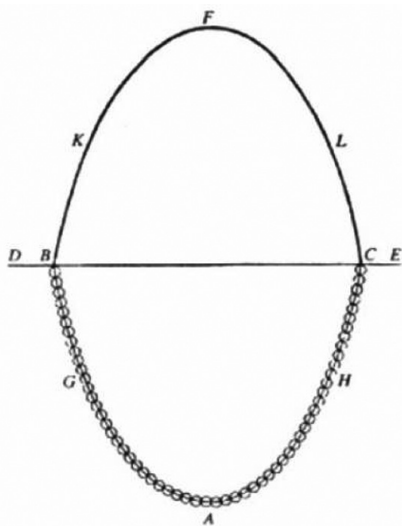


Figura 2.15 - Desenho de Giovanni Poleni (ca. 1683-1761) da analogia entre o arco e uma cadeia suspensa (Block, DeJong e Ochsendorf, 2006)

Não obstante, as histórias da catenária e da abóbada já haviam sido ligadas empiricamente em abóbadas antigas que são catenárias invertidas, como no caso do arco de Ctesifonte (Figura 2.6).

Esta afinidade estrutural com a catenária está também presente na natureza. Exemplo disso é o paralelismo entre as estruturas de cobertura suspensas por cabos e as teias de aranha. Os fios de suporte da teia suspendem em catenária e estão solicitadas à tração (pura), a linha central das ligações é uma linha de tensão de tração, tal como os cabos das coberturas. Essas mesmas catenárias, quando invertidas resultam em formas eficientes para abóbadas e cúpulas porque são as curvas naturais de transmissão da carga na

alvenaria, onde a linha de pressões⁴ é uma linha de tensão de compressão. Os arcos podem ter várias formas e dimensões, mas a linha de pressões segue sempre a forma da curva duma catenária invertida.

Num arco catenário invertido perfeito, as aduelas correspondem aos elos da cadeia. Como os elos da cadeia estão sob tração, as aduelas do arco em catenária invertida estão sob compressão e a linha de pressões está centrada nas aduelas. Os arcos catenários são sempre os mais estáveis, logo a sua espessura pode ser reduzida. Os arcos segmentares (arcos de circunferência) são também muito estáveis, uma vez que a linha de pressões está perto do centro do arco (Figura 2.16).

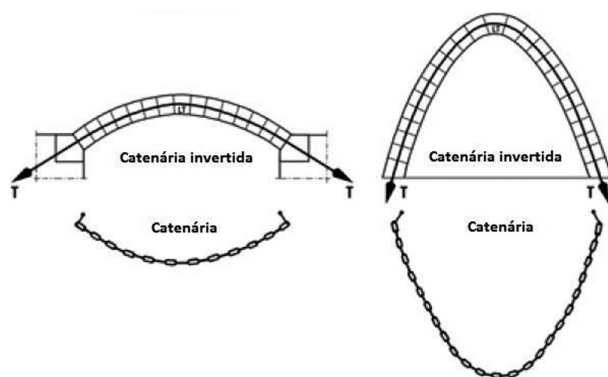


Figura 2.16 - Curvas catenárias e arcos: arco de circunferência (à esq.); arco catenário (à dir.) (<http://www.earth-auroville.com>)

2.4.2 LOCALIZAÇÃO DA LINHA DE PRESSÕES

A sucessiva ação das aduelas sobre as de baixo origina a referida linha de pressões. Um arco ou abóbada é estável desde que a linha de pressões permaneça no terço central da espessura do arco.

A linha de pressões está centrada no arco apenas no caso de arcos em forma de catenária invertida. Todos os outros tipos de arcos terão a linha de pressões a mover-se no terço central da espessura do arco, mas nunca estará centrada. Portanto, o arco estará submetido a uma combinação de tensões de compressão e de tração, que tenderão a induzir o colapso.

⁴ Numa estrutura de alvenaria, a linha de pressões é uma linha teórica que, através da estrutura, representa a trajetória das resultantes das forças de compressão. Para uma estrutura ser estável, a linha de pressões deve permanecer completamente no interior da estrutura.

Como a linha de pressões é a linha de tensão de compressão, todo o arco estará sob tensões de compressão quando essa linha está perto da linha média da espessura, no entanto, quando se afasta dessa linha, mas permanece ainda no terço central, isso criará uma tensão de tração no lado oposto da excentricidade da linha de pressões. Para otimizar o comportamento dum arco, deve-se tentar aproximar o mais possível a linha de pressões da linha que define o ponto médio da espessura do arco.

Dependendo da carga aplicada sobre o arco, a linha de pressões assumirá uma curva particular e o arco moldar-se-á em conformidade (Figura 2.17).

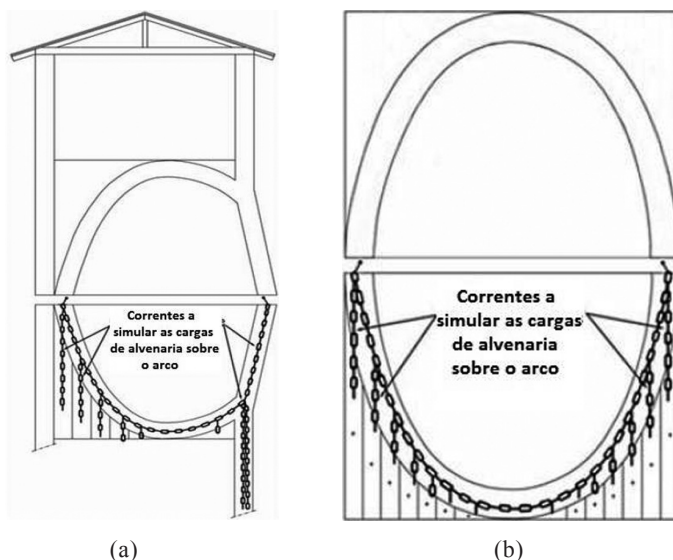


Figura 2.17 - Assunção dum curva particular da linha de pressões em função da carga aplicada: (a) Carga assimétrica; (b) Carga simétrica (<http://www.earth-auroville.com>) modificado

2.4.3 Forma e Empuxo

Os arcos, e por extensão as abóbadas e cúpulas, transmitem as cargas ao longo das aduelas que constituem a sua superfície até à linha das impostas, convertendo um carregamento geralmente vertical em tensões tangenciais fundamentais para o seu funcionamento mecânico. Decompondo as forças associadas a essas tensões segundo uma componente vertical e uma componente horizontal, obtém-se o empuxo (componente horizontal), o qual é significativamente influenciado pela curvatura da superfície e cujo contra-arresto representa, desde sempre, uma das questões cruciais da construção abobadada (Figura 2.18).

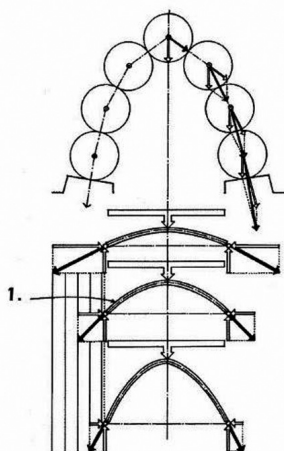


Figura 2.18 - Aplicação da lei do paralelogramo de forças num arco e componentes vertical e horizontal da força tangencial em função da curvatura da superfície (<http://www.elconstructorcivil.com>)

A relação entre o perfil da estrutura e o empuxo (Figura 2.18) é conhecida, pelo menos desde a época medieval. Alberti faz referência a ela no seu tratado de arquitetura, ao referir-se ao grande empuxo produzido pelos arcos rebaixados, aconselhando o uso de tirantes para eliminá-lo. Na realidade, o modo de contra-arrestar o empuxo, típico destas construções, ao longo dos tempos constitui uma das questões onde o engenho e a arte dos antigos mestres construtores foi posto à prova. Assim, desde os espessos pés-direitos característicos das catedrais romanas, nas quais a introdução de contrafortes permitiu a adoção de pés-direitos mais delgados, até outras formas de contra-arresto como, a já referida introdução de tirantes, o emprego de soluções de coberturas mais ligeiras, a disposição de naves laterais contíguas à nave principal e o recurso a arcobotantes, entre outros, foram vários os artificios a que os construtores medievais lançaram mão para fazer face ao empuxo.

3. FORMA: ENTRE A ESTÉTICA E A MECÂNICA

Desde os tempos mais remotos, o homem sente necessidade de conceber espaços que lhe proporcionem abrigo e proteção, cuja conceção reflita uma interdependência intemporal entre desempenho estrutural e elegância arquitetónica. No entanto, muitas vezes os aspetos estéticos colidem com os técnicos e a adoção duma forma adequada pode concorrer para a integração destas duas vertentes. A evolução arquitetónica resulta, por um lado, dos apelos da necessidade e da utilidade, e por outro, do reflexo dos avanços estruturais, os quais, entendidos num contexto mais amplo materializam-se nos elementos característicos dos diferentes estilos arquitetónicos.

Através do progresso da ciência da construção, desde o pilar e da viga da arquitetura dos egípcios, fenícios e gregos até à adesão ao arco de aduelas, assistiu-se a uma alteração profunda na conceção estrutural, a qual contribuiu para a adoção de formas curvas com significativas repercussões arquitetónicas. No Egito e na Grécia as pedras que compõem os edifícios são ornamentadas com molduras, enquanto todo o estilo arquitetónico está acomodado ao princípio de cargas horizontais que descarregam em pilares perpendiculares. Neste caso a estrutura e a estética da construção coincidem, o que é expectável nas primeiras construções, ainda livres de prévias restrições.

A introdução do arco e da abóbada nas construções, permitiu aos romanos erigir edifícios grandiosos com materiais de pequenas dimensões, porém no início a adoção do arco é feita com moderação e apenas em caso de necessidade. Os arquitetos romanos lançavam mão de todos os recursos decorativos para ocultar o papel importante que ocupava na estrutura dos edifícios, sendo escondido sob o estuque de revestimento ou mantido subserviente, como se a adoção deste expediente “desajeitado” e económico causasse algum embaraço aos técnicos. Todavia, aos poucos, primeiro a abóbada e depois o arco assumem um papel mais proeminente, expondo visivelmente o efeito dissonante que resulta da tentativa de harmonização de dois princípios distintos.

O emprego do arco implica superar o empuxo e as tensões diagonais que produz, ao contrário do sistema usado pelos gregos, no qual a decoração revestia uma estrutura que apenas exercia pressões perpendiculares, pelo que as diagonais devem ser ocultas por massas retangulares, decoradas dando a aparência de que apenas sustentam pressões verticais (Figura 3.1).

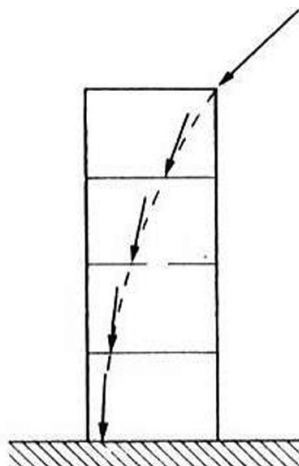


Figura 3.1 – Utilização de grandes massas de alvenaria para absorção das tensões diagonais (<http://www.xtec.cat>)

Esta solução, apesar de eficaz, indicia estar-se no início dum longo processo evolutivo, nomeadamente no que diz respeito à enorme quantidade de alvenaria necessária para a obtenção da massa suficiente para a anulação da componente horizontal das solicitações, e a pressuposição da continuidade do elemento estrutural. No primeiro caso está-se perante um uso excessivo de material, tornando-a uma solução cara e o segundo tem implicações arquitetónicas por delimitar a dimensão e o número de vãos, com influência ao nível do aproveitamento da iluminação natural. Os romanos utilizaram esta técnica numa tentativa de ocultação do funcionamento estrutural da construção, introduzindo, portanto, discordância entre a estética e a mecânica, no entanto, com o intuito de aligeirar a estrutura e torná-la menos onerosa, sem comprometer o adequado contra-arresto do empuxo, utilizaram-se durante o românico contrafortes como reforço dos pontos de apoio de arranque dos arcos, o que permitiu a redução da espessura das paredes de sustentação das abóbadas de berço e possibilitou, a abertura de vãos de maiores dimensões entre os contrafortes, beneficiando a iluminação natural (Figura 3.2).



Figura 3.2 – Exemplo de aplicação de contrafortes na arquitetura românica (<http://www.lafronteradelduero.com>)

Em contraponto com os romanos, os góticos, em tempos posteriores, adaptaram sabiamente a estética das suas construções à direção exata das exigências resistentes da estrutura abobadada, esta já não permanece oculta nos pilares e abóbadas, mas evade-se da arquitetura interna do edifício. De tal forma que, segundo Bartholomew, 1840, neste estilo arquitetónico tudo é estrutural, desde a chave pendente na intersecção das nervuras que dela radiam para colunas e pilastras, passando pelos arcobotantes que mais artisticamente conduzem o empuxo aos botaréis (Figura 3.3 a), os quais, discretamente os dissipam no terreno, aos pináculos, que tirando partido do sua massa e posicionamento, beneficiam o desempenho estrutural dos elementos subjacentes.

A ousadia da arquitetura gótica na busca de soluções mais ligeiras e económicas, “transporta” o empuxo para o exterior da construção e liberta praticamente as paredes das suas anteriores funções estruturais, permitindo a remoção dos panos de alvenaria entre os contrafortes e a integração, em seu lugar, de grandes vãos nas fachadas, dotando o ambiente interior duma maior iluminação natural (Figura 3.3 b).



Figura 3.3 – Elementos característicos do gótico: (a) Arcobotante, mosteiro da Batalha, séc. XV (<http://www.vector99.xtreemhost.com>); (b) Abertura de vãos entre contrafortes para aproveitamento da luz natural para iluminação interior, catedral de Chartres, séc. XII (Nunes, 2009)

A perícia exibida na disposição dos materiais numa catedral gótica e a astúcia demonstrada na forma como as forças gravíticas e a ação do vento são reduzidas a simples compressões conjugada com desempenho estrutural dos inovadores elementos do gótico despertaram o interesse de vários estudiosos ao longo dos anos, embora nem sempre os resultados sejam consensuais. Segundo Jacques Heyman, 2005, um dos debates mais célebres da história da arquitetura ocorreu no início do séc. XX em torno do alegado comportamento estrutural dos pináculos posicionados sobre os contrafortes do gótico francês, na sequência do racionalismo que, segundo Eugène Viollet-le-Duc (1814-1879), caracterizava a estrutura gótica no seu conjunto, com cada elemento estrutural a desempenhar uma função.

Pol Abraham (1891-1966) criticou esta abordagem funcional no seu artigo de 1934 no *Bulletin Monumental*, *Viollet-le-Duc et le rationalism médiévale*, ao contrário de Paul Frankl (1878-1962), que em 1960, num extenso estudo sobre o gótico, refere serem os pináculos um bom exemplo deste ponto de vista, pois “mediante o seu peso dão aos contrafortes toda a estabilidade necessária para suportar o empuxo dos arcobotantes”, na sequência duma tese de Christopher Wren (1632-1723) e da análise às linhas de pressões nas alvenarias efetuadas por Henry Moseley (1802-1872), 1843 (Figura 3.4 a).

Como exemplo, apresenta-se esquematicamente o sistema de contra-arresto da catedral de Lichfield (Figura 3.4 b, c e d), no qual o arcobotante transmite um impulso P até ao botaréu que está coroado por um pináculo de grande tamanho, de peso w (Figura 3.4 b); eliminando o pináculo, poder-se-á imaginar que haverá tendência para o colapso por deslizamento sob a ação de P (Figura 3.4 c); a simples adição dum peso relativamente pequeno w incrementa o atrito ao longo duma potencial linha de deslizamento e evita o colapso (Figura 3.4 d).

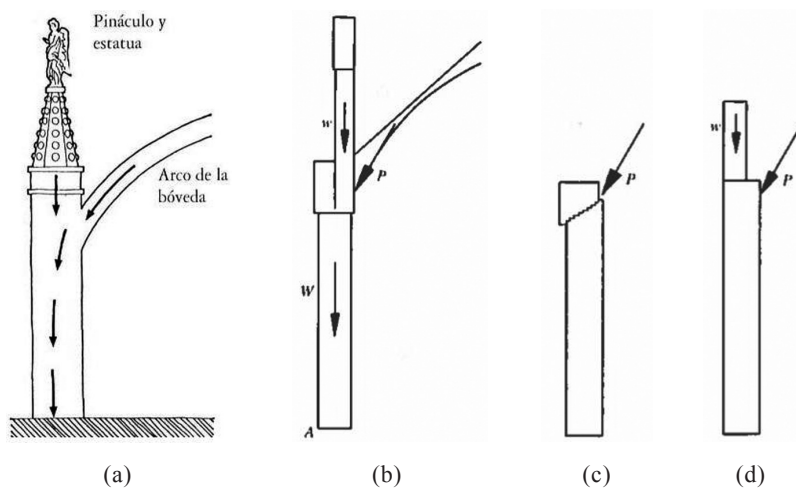


Figura 3.4 – Esquema do efeito estabilizador do pináculo: (a) Influência do peso no andamento da linha de pressões (<http://www.xtec.cat/>); (b) O botaréu será estável se não rodar em torno de A; (c) Colapso por deslizamento na ausência de pináculo; (d) Prevenção de colapso por deslizamento (Heyman, 2005)

Porém, de acordo com Heyman (2005), há motivos para duvidar da eficácia estrutural dos pináculos e parece à primeira vista, e assim o confirmam os cálculos, que um pináculo não pode senão ter um pequeno efeito na estabilidade global dum contraforte. O pináculo é, então um elemento projetado para satisfazer um critério aparentemente secundário.

No entanto, a controvérsia em torno da influência estrutural dos elementos arquitetónicos característicos do gótico estendeu-se também a outros ex-libris deste estilo, como arcobotante e as nervuras que integram as suas abóbadas de aresta. Por um lado, a exibição visual da estrutura de alvenaria não foi bem acolhida pelo movimento “Beaux-Arts” no final do séc. XIX e Julien Guadet (1834-1908) designou o gótico como o estilo escorado da arquitetura e, por outro, Abraham referia-se a esses elementos dizendo

sobranceiramente que as nervuras não suportavam a abóbada e que os arcobotantes não empuxavam.

Na realidade o arcobotante é um arco rampante que empuxa como todos os arcos. Os construtores góticos sabiam-no e, além disso, eram mestres no equilíbrio das massas que empregavam nas suas construções, dispendo-as em posições estratégica e previamente definidas e em quantidades apenas necessárias para lhes proporcionar a almejada estabilidade numa forma muito mais eficiente do que os seus antecessores. A utilização do arcobotante contribuiu também para este esforço de aligeiramento, como escora de pedra contra os diferentes empuxos gerados nas catedrais góticas. Utilizando o corte da abadia de Westminster como exemplo (Figura 3.5), identificam-se vários níveis de arcobotantes, três do lado esquerdo (lado sul) e dois do lado direito (lado norte) da figura. O arcobotante inferior, existente sobre o claustro destina-se a receber o empuxo da nave lateral sul, enquanto os arcobotantes intermédios escoram a abóbada da nave central e os arcobotantes superiores contra-arrestam o empuxo da cobertura.

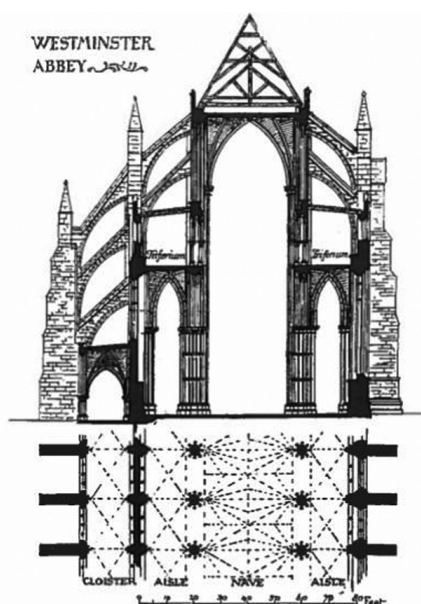


Figura 3.5 – Secção transversal, de oeste, da abadia de Westminster (Jackson, 1906)

Finalmente, foi também estudado por vários peritos a presumível contribuição estrutural das nervuras das abóbadas góticas, embora os resultados não tenham sido, mais uma vez, consensuais. Além de Abraham, também Torres

Balbás (1888-1960) questionava o desempenho estrutural das nervuras num artigo de 1920 da revista *Arquitectura*, sob o título, *De cómo evoluciona una teoría de la historia de la construcción*, referindo que, com base na experiência se podiam retirar as nervuras, uma vez que não suportavam as abóbadas, considerando-as cimbres provisórios. Segundo Fernando Chueca (1911-2004), 1951, as nervuras, uma vez solidarizadas com a superfície curva dos panos, isto é, após terminada a abóbada, não estão submetidas a tensões mecânicas diferenciadas na continuidade da estrutura. Na realidade, as evidências são contraditórias, uma vez que há exemplos de igrejas onde as nervuras das abóbadas se mantêm após o colapso dos panos de preenchimento, como na abadia arruinada de Ourscamp na Picardia, França, o que indicia que as nervuras disponibilizam um “esqueleto” estável. Mas há casos também em que sucede exatamente o oposto, como em Longpont, em Aisne, França ou em algumas igrejas góticas espanholas em resultado dos incêndios da guerra civil (1936-1939), como por exemplo a igreja del Pino, em Barcelona, sugerindo que os panos não necessitam de tal armação. Contudo, esta questão deve ter em consideração algumas particularidades importantes. A intersecção de superfícies com curvaturas diferentes, como nas arestas duma abóbada, origina elevadas concentrações de tensões que resultam da descontinuidade dum campo de forças: as tensões que variam progressivamente ao longo duma superfície contínua, devem mudar bruscamente de direção quando se quebra essa continuidade, e esta repentina alteração desencadeia tensões elevadas na zona de descontinuidade. Essa descontinuidade representa uma debilidade na abóbada que requer um reforço, que, simultaneamente, confere rigidez a toda a estrutura abobadada. De facto, a abordagem do comportamento das abóbadas em cruzaria deve efetuar-se no âmbito da tradição do cálculo por equilíbrio e da análise limite proposto por Heyman em 1995. Segundo este autor, a nervura cumpre uma função estrutural necessária como reforço das arestas, ainda que possa não ser essencial. Além disso, facilita a construção dos panos de alvenaria entre nervuras, permite eliminar parte das obras auxiliares, cobre as juntas defeituosas das arestas, além de poder ainda desempenhar um papel estético. Não obstante, a função estrutural das nervuras é clara: uma descontinuidade pronunciada numa superfície curva delgada deve ser reforçada, tal como sucede no caso duma abóbada quadripartida formada pela intersecção de duas abóbadas de berço, com linhas de chave ao mesmo nível⁵, com uma brusca descontinuidade diagonal, maior nos cantos (Figura 3.6).

⁵ Na cantaria medieval o *rampante* é a linha que forma o espinhaço da abóbada. Quando esta linha adota um perfil próximo da horizontal designa-se por *rampante plano*.

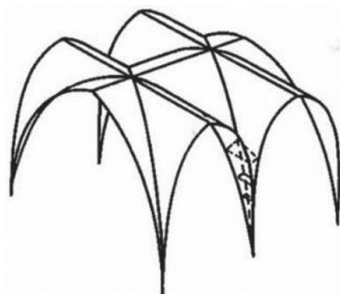


Figura 3.6 – Superfícies médias duma abóbada em cruzaria quadripartida de rampante plano (Fitchen, 1961)

As nervuras diagonais nessas descontinuidades, ou nervuras ocultas numa aresta simples, constituem-se como elementos estruturais que suportam toda a abóbada. No entanto, se a linha de chave da abóbada não é horizontal⁶, como por exemplo quando os panos são ligeiramente cupuliformes (Figura 3.7), surgirá então uma descontinuidade também nos arcos perpianhos, que neste caso se convertem também em verdadeiros elementos estruturais.

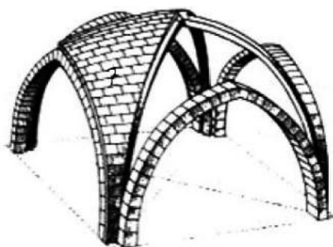


Figura 3.7 – Abóbada em cruzaria quadripartida de rampante redondo (<http://beaudayin.blogspot.pt/>)

Não obstante, a influência desta descontinuidade será função da sua grandeza, caso seja pouco significativa, a sua carga será pequena. Resumindo, as nervuras aplicadas numa descontinuidade funcionam como um reforço, no entanto, as nervuras dispostas sobre uma superfície curva contínua, de que são exemplos os terceletes ou as ligaduras, são apenas decorativas. Segundo Chueca (1951), a resistência deste tipo de abóbadas reside mais na própria curvatura dos panos do que na resistência das nervuras, isto é,

⁶ Neste caso, o espinhaço da abóbada forma uma curva. A sua curvatura pode ser mais ou menos pronunciada e cai em pendente até à chave dos arcos formeiros.

mais na propensão esferoidal do que na armação dos arcos. Daqui até às abóbadas lisas, não nervuradas, como por exemplo a abóbada vaída ou de barrete de clérigo, é um pequeno passo.

4. CONCLUSÕES

A necessidade de vencer vãos de cada vez maiores dimensões, confronta, desde sempre, o homem com um dos maiores desafios na arte da construção. No entanto, cedo se apercebeu de que os recursos disponíveis e o domínio das técnicas construtivas delimitavam, à partida, as várias alternativas disponíveis para alcançar esse objetivo. Assim, os gregos e os egípcios utilizaram um sistema construtivo retilíneo que se baseava no emprego de elementos horizontais de grandes dimensões apoiados em pilares nas extremidades, não tirando qualquer partido da forma na estabilidade da construção, ao contrário dos romanos que, dispondo elementos de pequenas dimensões (aduelas) segundo uma forma curva adequada, desenvolveram um processo construtivo que, além de inovador, permitia, dum maneira mais fácil, vencer vãos maiores.

A forma curvilínea típica da construção abobadada encerra em si mesma um conjunto de respostas a uma série de quesitos e necessidades construtivas. Por um lado, as características mecânicas dos materiais de construção disponíveis na altura, como a pedra e posteriormente o tijolo, recomendavam a sua sujeição a tensões de compressão, tirando, obviamente, partido da força da gravidade. Por outro, as dimensões e o peso dos materiais influenciava, não só o comportamento mecânico das futuras edificações, mas sobretudo o seu processo construtivo, assim, o uso de elementos de pequenas dimensões, de mais fácil manuseio, dispostos segundo uma forma curva adequada resultaram numa solução para algumas das questões construtivas mais pertinentes desse tempo.

No entanto, a adoção da forma curvilínea na construção comporta algumas particularidades técnicas. Desde logo, geram o empuxo característico destas estruturas, para cujo contra-arresto os antigos mestres construtores desenvolveram soluções, algumas delas bastante engenhosas. O aparecimento de algumas tipologias de abóbadas que concentram os empuxos nos cantos, como é o caso da abóbada de aresta, permitiu dispensar os pés-direitos dos seus contornos, o que possibilitou a criação de espaços mais amplos, concedendo maior liberdade arquitetónica aos projetistas.

Como ficou patente, apesar de à primeira vista, ser a estética da forma curvilínea que cativa um observador menos atento, por trás dela permanecem ocultas uma série de engenhosas soluções que garantem a estabilidade estrutural e que desempenham um papel fulcral na construção abobadada.

A estética e a mecânica (a arquitetura e a engenharia) são duas faces da mesma moeda (a forma) deste tipo de construção tradicional de alvenaria, de tal modo que, por vezes, não é fácil distinguir onde acaba uma e começa a outra, particularmente na arquitetura gótica.

Uma análise mais profunda sobre a forma na sua perspetiva estrutural é essencial para a compreensão dos princípios de dimensionamento e caracterização da tecnologia construtiva subjacente - muito para além do seu valor histórico. Os eventuais resultados desta prática possibilitarão a sua análise estrutural através de modelação numérica e a sua aplicação prática na reabilitação de construções abobadadas, cuja geometria é, por vezes, complexa.

BIBLIOGRAFIA

AUROVILLE EARTH INSTITUTE (AVEI). Vaulted structures: Stability notions. Internet: <http://www.earth-auroville.com/>, consultado em 20 de setembro de 2016.

BALBÁS, Leopoldo (1920). “De cómo evoluciona una teoría de la historia de la construcción”, *Arquitectura*, ano 3, nº 28, agosto, p. 205-215.

BARTHOLOMEW, Alfred (1840). *Specifications for practical architecture*, John Williams, Library of fine arts, London, UK.

BLOCK, Philippe, DEJONG, Matt and OCHSENDORF, John (2006). “As Hangs the Flexible Line: Equilibrium of Masonry Arches”, in Vários, *Nexus Network Journal*, vol. 8, nº 2, p. 13-24, Springer International Publishing, Cham, Switzerland.

CATALÁN, Arturo (2009). “A propósito de las bóvedas de crucería y otras bóvedas medievales”, *Anales del Historia del arte*, Volumen Extraordinario, p. 99-126.

CHUECA GOITIA, Fernando (1951). *La catedral nueva de Salamanca: Historia documental de su construcción*, Ediciones Universidad de Salamanca, Salamanca, España.

CHURTICHAGA, Josemaría (2001). *Aspectos constructivos de la reconstrucción de Villanueva de la Cañada*. Internet: <http://www.chqs.net/>, consultado em 20 de setembro de 2016.

FITCHEN, John (1961). *The construction of gothic cathedrals*, Oxford, USA.

GAGO, António, ALFAIATE, Jorge e LAMAS, António (2011). “The effect of the infill in arched structures: Analytical and numerical modelling”, in Vários, *Engineering Structures*, nº 33, p. 1450-1458, Amsterdam, Netherlands.

HEYMAN, Jacques (1999). *El esqueleto de piedra*, Instituto Juan de Herrera, Madrid.

HUERTA, Santiago (2004). *Arcos, bóvedas y cúpulas: Geometria y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Instituto Juan de Herrera, Madrid, España.

HUSSAINI, Dina (2005). *Design in Nature and Architecture*, thesis submitted to the faculty of Graduate Studies in partial fulfillment for the requirement for the degree of Master of Architecture, School of Architecture, Carleton University, Ottawa, Canada.

KURRER, Karl-Eugen (2008). *The history of the theory of structures: From arch analysis to computational mechanics*, betz-druck, Darmstadt, Germany.

NUNES, Patrícia (2009). *Teoria do arco de alvenaria: uma perspectiva histórica*, Dissertação de mestrado em estruturas e engenharia civil, Universidade de Brasília, Brasil.

RADELET-DE GRAVE, Patricia (2003). “The use of a Particular form of the Parallelogram Law of Forces for the Building of Vaults (1650-1750)”, in Vários, *Essays on the History of Mechanics: In Memory of Clifford Ambrose Truesdell and Edoardo Benvenuto*, p. 135-163, Birkhäuser Verlag, Switzerland.

REI, João, GAGO, António e SANTOS, Jorge (2014). “Abobadilha alentejana, uma técnica de construção imemorial”, in Vários, *V Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas*, Lisboa.

REI, João e GAGO, António (2016). “Abobadilha alentejana: Características e processos construtivos”, in Vários, *2º Congresso Internacional de História da Construção Luso-Brasileira*, vol. I, setembro, p. 91-105.

REI, João e GAGO, António (2016). “Arcos e pés-direitos: Regras de dimensionamento na tratadística”, in Vários, *2º Congresso Internacional de História da Construção Luso-Brasileira*, vol. I, setembro, p. 107-119.

ROSSO, Giuseppe (1828). *Pratica ed economia dell'arte di fabbricare*, Giuseppe Pagani, Firenze, Italia.

SENOSIAN, Javier (2003). *Bio-Architecture*, Elsevier, Oxford, UK.

STEADMAN, Philip (1979). *The evolution of designs*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

TOMASONI, Elide (2008). *Le volte in muratura negli edifici storici: technique costruttive e comportamento strutturale*, Dottorato di ricerca in Ingegneria

delle strutture – Modelazione, Conservazione e Controllo dei Materiali e delle Strutture, Università degli Studi di Trento, Italia.

WARE, Samuel (1822). *Tracts on vaults and bridges*, Thomas and William Boone, London, UK.

WENDLAND, David (2007). “Traditional Vault Construction Without Formwork: Masonry Pattern and Vault Shape in the Historical Technical Literature and in Experimental Studies”, in Vários, *International Journal of Architecture Heritage*, vol. 1, p. 311-365.

WILLIS, Robert (1835). *Remarks on the Architecture of the Middle Ages*, J. & J. Deighton, Cambridge, UK.

João Rei é Tenente Coronel de Engenharia. Atualmente desempenha funções como Professor de Engenharia Militar na Academia Militar. Desenvolve as suas atividades de investigação no CINAMIL.

António Gago é Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Civil, Arquitectura e Georrecursos, Instituto Superior Técnico. Desenvolve as suas atividades de investigação no centro Civil Engineering Research Innovation for Sustainability.