

SISTEMAS ESTRUTURAIS DESDE A PRÉ-HISTÓRIA ATÉ À ANTIGUIDADE (PARTE II)

João Carlos Martins Rei, CINAMIL, Academia Militar,
joao.rei@academiamilitar.pt

António Manuel Candeias de Sousa Gago, CERIS, Instituto Superior Técnico,
antonio.gago@tecnico lisboa.pt

DOI: https://doi.org/10.60746/8_17_42485

ABSTRACT

This article is the second in a sequential series of articles on the evolution of structural systems from Prehistory to Antiquity. It follows the previous article published in the preceding issue of *Proelium* magazine and will continue in upcoming issues. This second article summarises the contribution made by the successive peoples who occupied Ancient Mesopotamia to the development of various traditional structural systems during the first millennia of Antiquity.

The importance of the availability of local construction materials in the adoption of the different structural systems is addressed, covering both the materials that materialized the work in its final state, on the one hand, and the materials temporarily required during construction, on the other.

The traditional structural systems used, either in isolation or in combination, by the various peoples who occupied Ancient Mesopotamia are presented, with emphasis on the Sumerians who, as early as the 4th millennium BC, used the corbel vault, the voussoir arch and the dome on squinches.

The use of the voussoir arch over time is briefly described, based on the understanding of its structural behaviour. Initially buried, benefiting from the

counterbalancing thrust provided by the ground, and later elevated, it became an architectural and structural landmark that has endured from then until today.

Keywords: Traditional structural system, Construction material, Antiquity, Evolution, Voussoir arch, Mesopotamia.

RESUMO

Este artigo é o segundo de uma série sequencial de artigos sobre a evolução dos sistemas estruturais desde a Pré-história até à Antiguidade, o qual surge na sequência do anterior publicado no número precedente da revista *Proelium* e terá continuidade nos próximos números da revista. Neste segundo artigo apresenta-se, sinteticamente, a contribuição dada pelos sucessivos povos que ocuparam a Antiga Mesopotâmia para o desenvolvimento de vários sistemas estruturais tradicionais durante os primeiros milénios da Antiguidade.

Aborda-se a importância da disponibilidade de materiais de construção locais na adoção dos diferentes sistemas estruturais, dos materiais que materializavam a obra no seu estado final, por um lado, e dos materiais requeridos temporariamente durante a construção, por outro.

Apresentam-se os sistemas estruturais tradicionais utilizados, de forma isolada ou em conjunto, pelos vários povos que ocuparam a Antiga Mesopotâmia, com destaque para os sumérios que já no IV milénio a.C. utilizavam a abóbada em consola, o arco de aduelas e a cúpula sobre trompas.

Descreve-se, resumidamente, a utilização do arco de aduelas ao longo do tempo, em função do domínio do seu funcionamento estrutural. Inicialmente enterrado, beneficiando do contrabalanço do empuxo proporcionado pelo terreno e posteriormente elevado, consumando um marco arquitetónico e estrutural que perdura, desde então, até à atualidade.

Palavras-chave: Sistema estrutural tradicional, Material de construção, Antiguidade, Evolução, Arco de aduelas, Mesopotâmia.

1. INTRODUÇÃO: CONTRIBUIÇÃO DOS POVOS QUE OCUPARAM A ANTIGA MESOPOTÂMIA

Desde a Antiguidade, várias civilizações contribuíram para o desenvolvimento de diversos sistemas estruturais. Nos primeiros milénios destacaram-se os povos que ocuparam a Antiga Mesopotâmia e as civilizações egípcia e minoica. Posteriormente, micénicos, gregos, etruscos e romanos deram também contribuição relevante.

A Antiga Mesopotâmia, no Médio Oriente, era a região formada pelas bacias dos rios Tigre e Eufrates, ao longo das quais se depositava matéria-prima adequada para a fabricação de tijolos. Na Antiga Mesopotâmia a madeira era escassa e a pedra era de baixa qualidade, mas, no entanto, havia abundância de argila nas margens daqueles rios. Inicialmente, os tijolos eram feitos de barro e palha num molde de madeira, secos ao sol. Mais tarde, por volta de 3000 a.C., surgiram nessa região os primeiros tijolos cozidos (Chang & Swenson, <https://www.britannica.com/technology/construction>). Segundo Wright (2009), a partir do V milénio a.C., os povoados da Antiga Mesopotâmia, deixaram de ser de unidades familiares (i. e. aldeias) e desenvolveram comunidades de maior dimensão, o que exigiu edifícios públicos de vários tipos, para além de habitações privadas. Face a esta conjuntura, os construtores dos povos que ocuparam sucessivamente aquele território durante a Antiguidade, entre os quais se destacam os Sumérios, os Acádios, os Amoritas, os Assírios e os Caldeus, desenvolveram sistemas estruturais inovadores, os quais se materializaram em novas técnicas de construção, tendo em vista, particularmente, a cobertura de espaços amplos com vãos de maiores dimensões. De entre esses sistemas estruturais, destacam-se a aproximação de fiadas

(arco em consola), os leitos inclinados, o arco de aduelas e o arco-diafragma, cujas particularidades construtivas e estruturais justificam uma abordagem mais detalhada.

2. APROXIMAÇÃO DE FIADAS

Esta solução, sumariamente apresentada na parte I da presente série de artigos, terá surgido sensivelmente na mesma altura na Mesopotâmia e no Egito. Na Mesopotâmia, segundo Bianchini (2010), entre os exemplos mais antigos conhecidos estão as cúpulas de alguns túmulos reais de Ur (2600-2500 a.C.), tanto em pedra como em tijolo cozido, assentes sobre trompas irregulares que partiam do solo.

Woolley (1880-1969) (1934), na sequência das escavações que levou a efeito no cemitério real de Ur, identificou alguns túmulos com câmaras de planta aproximadamente quadrada cobertos com cúpulas circulares, nomeadamente o túmulo privado (Private Grave) PG 779 (Ilustração 1).

Quando as saliências das fiadas eram mantidas constantes, obtinha-se uma abóbada triangular (Ilustração 2 (a)), mas, frequentemente, as fiadas eram progressivamente mais salientes em direção ao topo, uma vez que diminui a carga a parte em consola, a qual pode ser mais alongada (Ilustração 2 (b)).

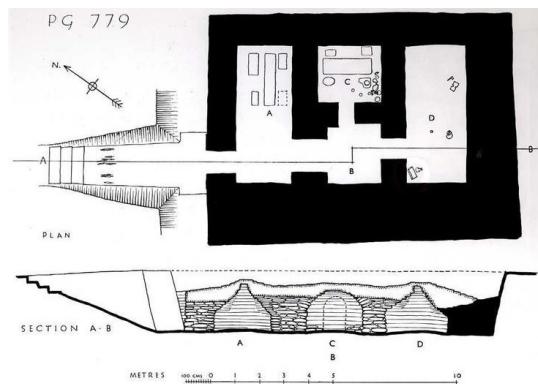


Ilustração 1: Cobertura em cúpula circular sobre planta quadrada com recurso a trompas em consola (câmaras B e C). Túmulo privado (PG) 779: planta e corte, cemitério real de Ur (c. 2500 a.C.).

Fonte: <https://hist1039-16.omeka.fas.harvard.edu/items/show/31?>



(a)

(b)

Ilustração 2: Abóbadas de tijolo em consola: (a) Túmulo do rei Shulgi, Ur (séc. XXI a.C.); (b) Túmulo Caldeu em Mugheir, atual Iraque (c. 2200 a.C.).

Fonte: (a) <http://www.greydragon.org/trips/Iraq/Ur0011.jpg>;

(b) <http://www.gutenberg.org/files/24654/24654-h/24654-h.htm>

3. LEITOS INCLINADOS

Esta técnica consiste em executar abóbadas com fiadas inclinadas 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 arqueada.

Os primeiros exemplares abobadados terão sido pequenas abóbadas de berço de leitos inclinados descobertos nas regiões da Mesopotâmia e do Baixo Egito, datados entre o V e o IV milénio a.C. Entre as aplicações primitivas deste sistema de abobadamento, está a reportada por Moquin (1994) em *Nineveh*, na Mesopotâmia, datada de 3200 a.C. Outros exemplos mais tardios foram encontrados por Place (1818-1875) em *Khorsabad*, na Assíria (atual Iraque), sob a forma de drenos arqueados, apontados e elíticos (Ilustração 3).

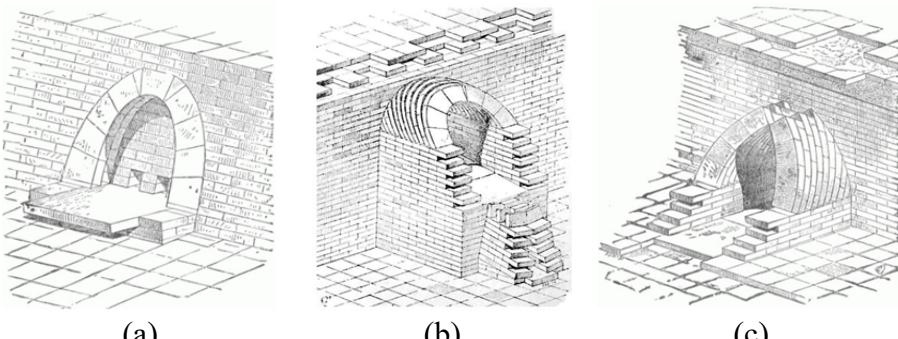


Ilustração 3: Vistas em perspetiva de vários tipos de drenos abobadados encontrados em Khorsabad (720 a.C.): (a) e (b) Duplos; (c) Simples.

Fonte: (a) Perrot & Chipiez (1884).

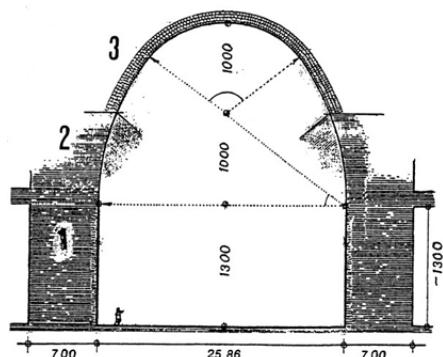
Destes drenos destacam-se os tijolos com uma forma trapezoidal com dois dos lados ligeiramente arredondados que progridem dois a dois nos flancos da abóbada. Cada um destes flancos é constituído por quatro tijolos sensivelmente diferentes, o que

implica a existência de quatro moldes diferentes para a sua fabricação, para além de um quinto tipo de tijolo diferente para a execução do fecho (Ilustração 3 (c)).

Segundo Churtichaga (2001), posteriormente, povos como os Sassânidas da Pérsia a partir do séc. II d.C., desenvolveram ainda mais esta técnica, chegando a cobrir, sem cimbre, enormes e complexos espaços abobadados. Desses espaço, destaca-se o palácio de Ctesifonte, cujo arco, *Taq Kasra* («arco de Cosroes»), vencia um vão de 25,9 m (nos rins em consola e na coroa em leitos inclinados) (Ilustração 4).



(a)



(b)

Ilustração 4: Arco *Taq Kasra* do Palácio de Ctesifonte, Antiga Mesopotâmia (Séc. VI d.C.): (a) Representação do existente; (b) Secção transversal da abóbada do *Iwan* identificando três zonas de alvenaria de tijolo: 1. Pé-direito; 2. Rins da abóbada em consola; 3. Coroa da abóbada em leitos inclinados.

Fonte: (a)

<https://i.pinimg.com/originals/8b/0f/8f/8b0f8f02b5c3ed7b5c7b04f209437d3b.jpg;>

(b) Wright (2009).

Estas técnicas foram, posteriormente absorvidas pela arquitetura islâmica, na sequência das conquistas árabes da Mesopotâmia e da Pérsia. Um exemplo é o de uma abóbada de trompas de ângulo de tijolo seco ao sol, assente em fiadas cónicas,

encontrada em Tell al-Rimah (assentamento arqueológico localizado no Sudoeste de Nívive – antiga Assíria, norte da Mesopotâmia) e que cobre um compartimento de planta retangular de 2,30x1,55 m² (Ilustração 5). Segundo Arce (2006), esta é a abóbada mais antiga deste tipo encontrada neste assentamento e representa a contribuição mesopotâmica mais significativa do uso do tijolo no domínio da tecnologia de construção.

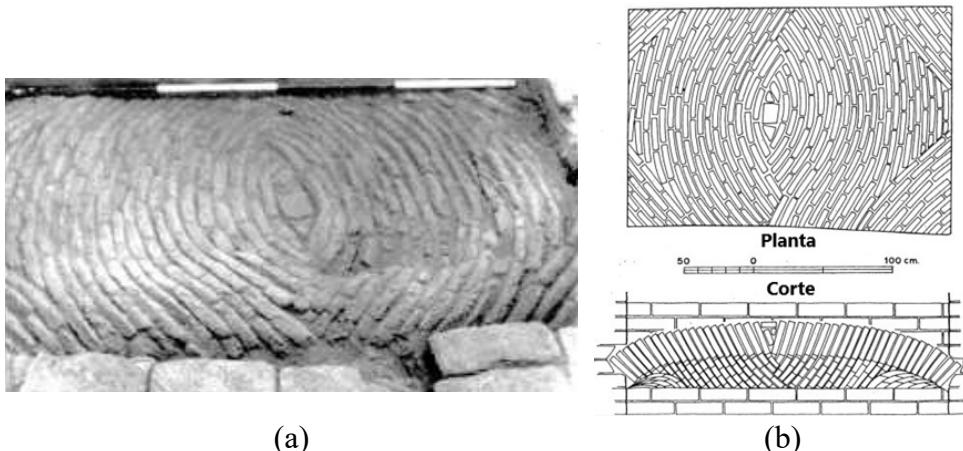


Ilustração 5: Abóbada de vela do Grande Templo de Tell al-Rimah, atual Iraque (c. 2100 a.C.): (a) Vista em perspetiva; (b) Planta e corte.

Fonte: (a) Fortea (2013); (b) Adaptado de Bianchini (2010).

4. ARCO DE ADUELAS

Em termos estáticos, o princípio do arco é relativamente simples. Dado um arco sem carregamento, a sua chave está sujeita aos empuxos correspondentes ao seu peso próprio. Cada uma das aduelas laterais contíguas à chave estará em equilíbrio sob a ação do empuxo da chave, do seu peso e do empuxo decorrente da aduela imediatamente inferior. Generalizando esta abordagem a todo o arco, unindo os pontos de aplicação destes empuxos traça-se uma linha, denominada linha de

pressões, que representa um dos estados de equilíbrio possível para o arco (Ilustração 6).

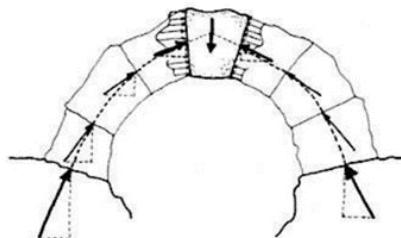


Ilustração 6: Representação esquemática da sucessiva transmissão das resultantes dos empuxos ao longo de um arco sujeito ao seu peso próprio e correspondente linha de pressões (a tracejado).

Fonte: Huerta (2004).

Segundo Beek (1987), os arqueólogos que se debruçaram sobre a origem da construção arqueada são unâimes em considerar que os arcos e as abóbadas tiveram origem nos pântanos do Antigo Baixo Egito ou na Mesopotâmia. Ao longo das margens dos rios Nilo, Tigre e Eufrates crescia uma planta não lenhosa que, na altura, ganhou grande protagonismo no panorama da construção: o juncos. O juncos apresentava-se aos construtores Pré-dinásticos (c. 5500 – 3100 a.C.) e Ubaides em abundância e razoavelmente resistente quando unido e cintado entre si, formando molhos (Palmer (2012)). Simultaneamente, depositava-se ao longo das margens dos rios uma grande quantidade de lodo, matéria-prima que se revelou de enorme potencial.

Segundo Woolley (1928), na sequência das escavações realizadas nos túmulos reais de Ur dos Caldeus, aquando da construção destes túmulos, no IV milénio a.C. (Ilustração 7 (a)), os Sumérios já conheciam a abóboda em consola, o arco de aduelas e a cúpula sobre trompas. O prolongamento de um arco em consola em profundidade

ao longo de vários metros é uma abóbada. As trompas em consola foi uma das soluções que os antigos construtores encontraram para cobrir espaços de planta não circular com cúpulas circulares (conforme apresentado em § 2.). Cada uma das trompas é composta por uma série de fiadas horizontais de um quarto de círculo. A fiada inferior constituída por um ou dois elementos é assente no canto entre as duas paredes ortogonais a uma cota intermédia. Acima desta são dispostas as fiadas subsequentes, desaprumadas umas relativamente às outras, em consolas progressivamente mais longas até à ligação de todas as trompas com o fecho do anel (Ilustração 7 (b)).

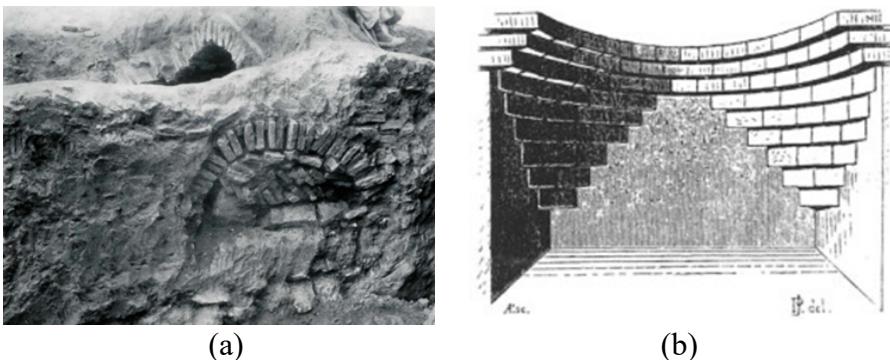


Ilustração 7: Emprego de vários sistemas estruturais pelo Sumérios: (a) Túmulo saqueado. Túmulos reais de Ur dos Caldeus, c. 3500 a.C.; (b) Esquema representativo um desses sistemas: de trompas em consola.

Fonte: (a) Woolley (1928); (b) Gonzalo (2011).

Nestes túmulos, segundo Woolley (1928), surgem todas as fases de desenvolvimento tecnológico da construção em tijolo, desde a abóbada em consola até ao arco de aduelas.

Inicialmente, os arcos da Antiga Mesopotâmia e do Egito eram de pequeno vão e encontravam-se abaixo do nível do terreno, como é o caso dos túmulos (Ilustração

8) e dos canais de drenagem (Ilustração 9), uma vez que desta forma a componente horizontal do empuxo resultante deste tipo de estruturas podia ser naturalmente equilibrado pelo terreno envolvente.



(a)



(b)

Ilustração 8: Aplicação do princípio do arco em túmulos: (a) Abóbada de túmulo assírio em Kaleh-Shergat, Assur, Mesopotâmia, atual Iraque (III milénio a.C.); (b) Vista do interior da sepultura de um túmulo abobadado de tijolo plano-convexo cozido sob o designado Palácio Norte de Tell Asmar (período acadiano, c. 2334 – 2154 a.C.)

Fonte: (a) <https://www.wisdomlib.org/mesopotamiam/book/thr-civilization-of-babylonia-andassyria/d/doc3961.html#page-379>; (b) Delougaz et al. (1967).



Ilustração 9: Aplicação do princípio do arco em túmulos: (a) Sistema de esgoto abobadado sob o Palácio Norte, Tell Asmar (período acadiano); (b) Dreno abobado de tijolo em Cafaja (antiga Tutube), Mesopotâmia (4000-2500 a.C.).

Fonte: (a) Delougaz et al. (1967); (b) Diamond & Kassel (2018).

Segundo alguns autores, a partir do final do IV milénio a.C. a construção de coberturas abobadadas de tijolo na região da Mesopotâmia estava bem assimilada pelos construtores, pelo menos nalgumas variantes. Contudo, a concretização deste conhecimento estava materializada, maioritariamente, em construções subterrâneas. Dado o enorme potencial estrutural e arquitetónico intrínseco do arco de aduelas, era expectável que alguma civilização libertasse os arcos e as abóbadas da sua aplicação a construções subterrâneas e à arquitetura funerária.

Nos primeiros milénios, o emprego do arco acima do solo era residual e resumia-se a construções utilitárias como fornos, poços, silos, etc. São poucos os exemplares pioneiros na materialização da “ascensão” das estruturas arqueadas. Um dos exemplos mesopotâmicos desta metamorfose, datado do final do IV milénio a.C., encontra-se em *Tepe Gawra* (antigo assentamento mesopotâmico na região de Mosul, no nordeste do Iraque, ocupado entre 5000 e 1500 a.C.), materializado numa abóbada de berço de tijolos secos ao sol que cobre um compartimento de planta

retangular com uma largura de 3,25 m por um comprimento de 8,50 m (Ilustração 10).

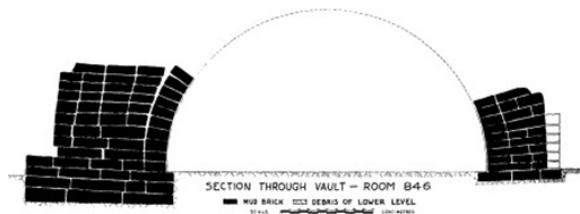


Ilustração 10: Secção transversal de uma abóbada de tijolos dispostos radialmente no compartimento nº 846 em *Tepe Gawra* (final do IV milénio a.C.)

Fonte: Speiser (1935).

Segundo Speiser (1935), a linha das nascenças da abóbada é próxima do nível do solo e uma das paredes tem mais do dobro da parede oposta (Ilustração 10). Esta disparidade terá sido considerada necessária devido ao facto da parede mais espessa ficar livre e não dispor de paredes de apoio como a do lado oposto.

Entretanto, o emprego do arco vulgarizou-se e o seu uso tornou-se corrente nas padieiras arqueadas das habitações dos cidadãos sumérios do II milénio a.C., há quatro mil anos, e noutras construções (Ilustração 11).



Ilustração 11: Alguns dos primeiros arcos elevados: (a) Compartimento central da casa do arco, Tell Asmar, Iraque, (cerca de 2500 a.C.) (B) Templo Edublalmahr, antiga Ur, Iraque (2100 a. C.).

Fonte: (a) Delougaz et al. (1967); (b) <https://traveltoeat.com/the-arch-in-architecture-and-history/>

5. ARCO-DIAFRAGMA

Nos primeiros tempos da construção arqueada, os construtores eram cuidadosos acerca dos pés-direitos dos seus arcos porque sabiam como o arco os “empuravam” para fora. No entanto, já durante a Antiguidade sabiam que em espaços contíguos de vão equivalente os empuxos resultantes de cada um dos vãos se anulam mutuamente, tornando a estrutura mais estável (Ilustração 12).

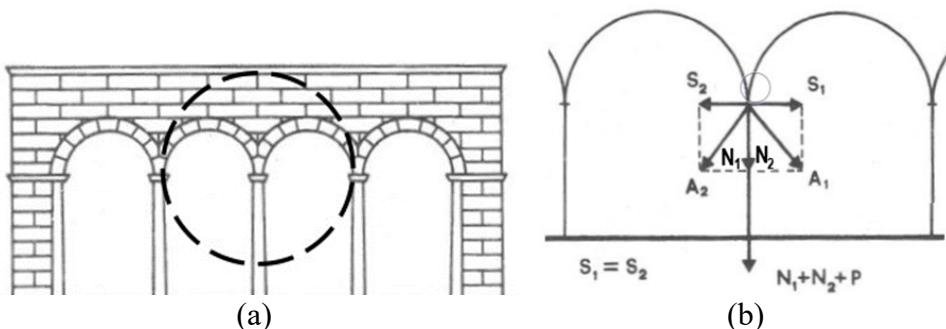


Ilustração 12: Exemplo da aplicação do princípio da resistência ativa ou do contra empuxo em elementos contíguos: (a) Arcada constituída por quatro arcos contíguos: a anulação mútua do empuxo nos pilares intermédios permite que sejam mais esbeltos; (b) Representação estática esquemática da anulação da componente horizontal dos empuxos dos arcos contíguos (S_1 e S_2).

Fonte: Adaptado de Bersano (2009).

Este conhecimento poderá estar na génese de um novo sistema estrutural que ficou conhecido como arco-diafragma. Etimologicamente, a palavra diafragma vem do grego *diaphrágma*, que significa separação, barreira, obstrução. Assim, denominam-se arcos-diafragma os arcos de suporte que, como o nome sugere, separam transversalmente um espaço construído com o objetivo de reduzir o vão longitudinal. Na verdade, podem considerar-se, igualmente, como paredes perfuradas por arcos posicionados transversalmente ao maior vão (Zaragozá, 2003).

Segundo Arce (2003), todas as provas existentes sugerem uma origem mesopotâmica para ambas as técnicas (lintéis e abóbadas sobre arcos), bem como para os arcos-diafragma, cujas origens podem ser encontradas na Antiga Mesopotâmia durante o período babilónico (a civilização babilónica sucedeu à suméria e existiu entre os séculos XVIII e VI a.C.). Os exemplares de arco-diafragma mais antigos conhecidos, de origem parto-sassânida, são também desse período e encontram-se na região de Ashur, Hatra e Khark. Segundo este autor, se ambas as inovações técnicas são de

origem mesopotâmica/persa, faz sentido que a combinação de ambas, tenha sido também concebida nessa região.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo surge na sequência de outro sobre a evolução dos sistemas estruturais tradicionais durante o período final da Pré-história publicado na edição anterior da revista *Proelium*. Desta feita, o presente artigo estende a abordagem iniciada no artigo anterior para a Antiguidade.

Nesta edição da revista, apresentam-se os contributos que os povos que ocuparam a Antiga Mesopotâmia facultaram para a evolução dos sistemas estruturais, assim como os fatores que a potenciaram.

Na sequência deste artigo, na próxima edição da revista, apresentar-se-ão o enquadramento e os méritos subjacentes à manifestação do potencial construtivo de uma grande civilização da Antiguidade, a civilização egípcia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arce, I. (2003). From the Diaphragm Arches to the Ribbed Vaults. An Hypothesis for the Birth and Development of a Building Technique. *Proceedings of the First International Congress on Construction History*, Madrid, 225-241.
- Arce, I. (2006). Umayyad Arches, Vaults & Domes: Merging and Re-creation. Contributions to Early Islamic Construction History. *2nd International Congress on Construction History*, Cambridge, 195-220.
- Bersano, E. (2009). *Ricerca degli Schemi Strutturali di Edifici Storici e Analisi del loro Comportamento Statico e Dinamico*. Tesi di Laurea. Università di Bologna.

- Churtichaga, J. (2001). Aspectos Constructivos de la Reconstrucción de Villanueva de la Cañada. El Uso de los Sistemas de Bóvedas Tabicadas y su Perspectiva Histórica. *Villanueva de la Cañada, Historia de una Reconstrucción*, 59-80. Centro Cultural La Despernada.
- Delougaz, P., Hill, H., Lloyd, S. (1967). *Private Houses and Graves in the Diyala Region*. The University of Chicago Press.
- Diamond, R., & Kassel, B. (2018). A History of the Urban Underground Tunnel (4000 B.C.E. – 1900 C.E.). *Journal of Transportation Technologies*, 8, 11-43
- Fortea, M. (2013). *Análisis Estructural de Bóvedas de Fábrica. La Eficacia de la Geometría*. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura.
- Gonzalo, J. (2011). Las Cúpulas de Mocárabes. *Actas del Séptimo Congreso Nacional de Historia de la Construcción*, Santiago, 1021-1029.
- Huerta, S. (2004). *Arcos, Bóvedas y Cúpulas. Geometría y Equilibrio en Cálculo Tradicional de Estructuras de Fábrica*. Instituto Juan Herrera.
- Moquin, M. (1994). Ancient Solutions for Future Sustainability: Building with Adobe, Rammed Earth and Mud. *CIB TG 16, Sustainable Construction*, 543-552
- Palmer, M. (2012). *Expressions of Sacred Space: Temple Architecture in the Ancient Near East*. Doctor of Literature and Philosophy. University of South Africa
- Perrot, G. & Chipiez, C. (1884). *Histoire de l'Art dans l'Antiquité*, tome II, *Chaldée et Assyrie*. Librairie Hachette et C^{ie}.
- Speiser, E. (1935). *Excavations at Tepe Gawra* (vol. I). University of Pennsylvania Press: Philadelphia
- Van Beek, G. (1987). Arches and Vaults in the Ancient Near East. *Scientific American*, vol. 257 (1), 96-103

- Woolley, C. (1928). The Royal Tombs of Ur of the Chaldees. *The Museum Journal*, vol. XIX (nº 1), 5-34
- Woolley, C. (1934). *Ur Excavations*, vol. II, *The Royal Cemetery*. The Trustees of Two Museums
- Wright, G. (2009). *Ancient Building Technology* (vol. 3). Leiden and Boston: Brill
- Zaragozá, A. (2003). Arquitectura de Arcos de Diafragma. *Arquitecturas del Gótico Mediterráneo*, 110-128. Generalitat Valenciana.