

ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE UMA ABÓBADA DE ALVENARIA PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS DISCRETOS

Eduardo M. Bretas

Jorge P. Gomes

J. V. Lemos

ebretas@lnec.pt

jgomes@lnec.pt

vlemos@lnec.pt

Departamento de Barragens de Betão

Laboratório Nacional de Engenharia Civil

Av do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

Resumo. *O Aqueduto das Águas Livres, localizado em Lisboa, hoje desactivado, entrou em funcionamento em 1748. Construído em alvenaria de pedra e tendo uma extensão de 14 km desde a nascente principal, é ainda constituído por diversos aquedutos subsidiários e de distribuição, com um total de 58 km de extensão.*

Num dos muitos canais subterrâneos existentes está localizada uma abóbada que permite a intersecção de dois alinhamento de túneis. Esta abóbada encontra-se sobre uma importante artéria da cidade de Lisboa com um trânsito automóvel bastante intenso.

O estado de conservação da abóbada tem suscitado interrogações quanto à sua capacidade resistente, verificando-se recentemente o desprendimento de um bloco de alvenaria e o deslizamento parcial de outros, o que motivou uma medida de segurança imediata que passou pelo total escoramento da estrutura.

Procedeu-se a análise estrutural da abóbada de alvenaria através do 3DEC. Esta aplicação baseia-se no Método dos Elementos Discretos (MED) e tem vindo a ser utilizada, com crescente interesse, no estudo das estruturas de alvenaria.

O presente artigo aborda alguns aspectos relacionados com o MED, descreve os procedimentos adoptados para execução do modelo e apresenta resultados quanto a capacidade resistente. A parte final é dedicada avaliação dos resultados e apresentação de soluções para a sua reabilitação e reforço.

Palavras-chave: Alvenaria, Abóbada, Elementos discretos

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho descreve a metodologia empregue na elaboração de um estudo sobre as condições de segurança de uma abóbada de alvenaria em pedra, localizada na Praça do Príncipe Real, em Lisboa, pertencente ao Aqueduto do Loreto, que por sua vez faz parte do complexo do Aqueduto das Águas Livres, baseado em modelos numéricos devidamente apropriados ao tipo de estrutura em causa. Estes modelos serviram para a análise dos fenómenos originários da degradação estrutural existente, a avaliação da segurança estrutural da abóbada e previsão de uma solução de reabilitação estrutural para a verificação da segurança.

2. DESCRIÇÃO E ESTADO ACTUAL DA ESTRUTURA

O Aqueduto das Águas Livres, hoje desactivado, foi mandado construir pelo Rei D. João V, a fim de fornecer água à Lisboa, de acordo com o projecto de Manuel da Maia, tendo abastecido a cidade a partir de 1748. O aqueduto com uma extensão de 14 km desde a nascente principal, mas com os diversos aquedutos subsidiários e de distribuição perfazem um total de 58 km, abastecia uma rede de chafarizes na cidade. O Aqueduto construído em alvenaria, possui, na sua parte mais monumental, um conjunto de 35 arcos, de autoria de Custódio Vieira, sobre o Vale de Alcântara, onde se destaca o maior arco em pedra de vão do mundo, com 65 m de altura e 32 m de abertura.

Num dos muitos canais subterrâneos existentes está localizada uma abóbada que permite a intersecção de dois alinhamento de túneis (Fig. 1). Esta abóbada é parte integrante do aqueduto do Loreto, localizando-se na intersecção das Ruas Dom Pedro V, da Escola Politécnica e da Mãe de Água (Fig. 2).



Figura 1 – Vista parcial da abóbada de alvenaria

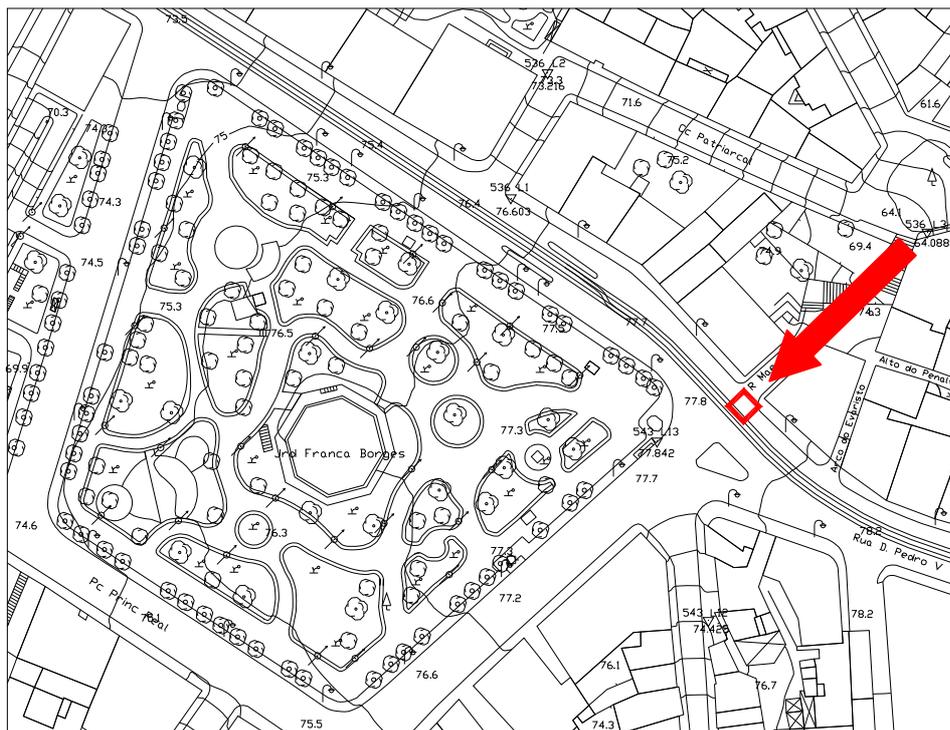


Figura 2 – Cartografia: localização da abóbada de alvenaria subterrânea

O estado de conservação da abóbada tem suscitado interrogações quanto à sua capacidade resistente, tendo-se verificado o desprendimento de um bloco de alvenaria (Fig. 3) e o deslizamento parcial de outros (Fig. 4), o que motivou a implementação urgente de uma estrutura provisória de suporte para escoramento da estrutura. A Figura 5, apresenta uma vista parcial da abóbada após a colocação da estrutura de suporte, constituída por um reticulado de tubos metálicos.



Figura 3 – Localização na abóbada do bloco de pedra em falta



Figura 4 – Aspecto do deslizamento de alguns blocos de pedra



Figura 5 – Vista parcial da estrutura provisória de suporte da abóbada de alvenaria

A cedência dos blocos de alvenaria da abóbada, já provocou o aparecimento de uma acentuada depressão no pavimento exterior, referente à faixa de rodagem da Rua Dom Pedro V (Fig. 6).

A abóbada é constituída por blocos de alvenaria de calcário, que formam um paramento em junta seca. A sua definição geométrica foi efectuada a partir de um levantamento topográfico (Fig. 7 e 8). Os elementos fornecidos diziam respeito às dimensões gerais da estrutura e também representavam a estereotomia das pedras.

As principais dimensões são apresentadas na Tabela 1. A estrutura caracteriza-se por estar sujeita a um pequeno recobrimento de apenas 0,16 m, que separa o extradorso da abóbada da superfície do terreno. Esta espessura foi confirmada através de uma sondagem executada pelo pavimento exterior, junto à faixa de rodagem. Outra característica importante é o relativo abatimento da abóbada, apresentando uma altura de arco de 0,92 m, para um vão mínimo de 4,25 m.



Figura 6 – Cedência da faixa de rodagem, sobre a abóbada de alvenaria

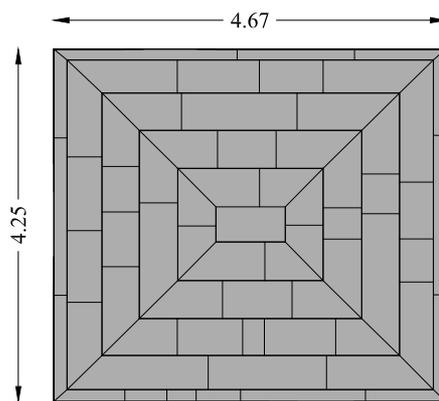


Figura 7 – Planta da abóbada [m]

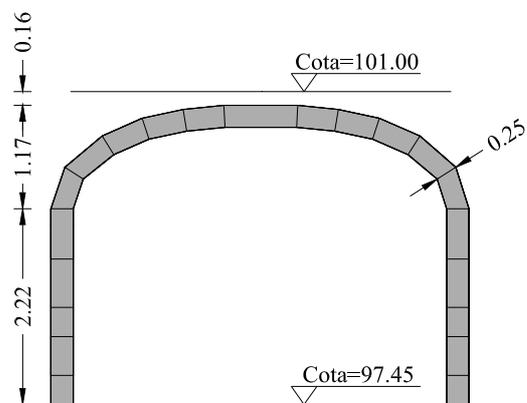


Figura 8 – Corte vertical na zona da abóbada [m]

Tabela 1 – Principais dimensões da abóbada

Designação	Dimensão
Dimensão em planta	4.25 x 4.67 m ²
Altura das paredes	2.22 m
Altura do arco	0.92 m
Espessura	0.25 m
Recobrimento	0.16 m

3. DESCRIÇÃO DO MODELO NUMÉRICO

3.1 Aspectos relacionados com o Método dos Elementos Discretos

As estruturas de alvenaria caracterizam-se por serem meios descontínuos, constituídos por blocos e juntas. A modelação numérica deste género de estruturas pode considerar explicitamente estas juntas, ou idealizar meios contínuos homogeneizados (Lourenço, 2002).

Em face do tipo de estrutura e da problemática envolvente, foi adoptada uma abordagem de meio descontínuo, através do Método dos Elementos Discretos (MED). O MED tem vindo a ser utilizado, com crescente interesse, no estudo de estruturas de alvenaria (Lemos, 1997 e 2006). Assim, foi elaborada uma discretização da estrutura em elementos discretos, tendo sido utilizado o programa 3DEC (Itasca) para a sua resolução.

A modelação pelo MED pressupõe a existência de blocos e juntas e admite características mecânicas distintas para ambos. As juntas são materializadas através de contactos entre blocos que, no decurso da análise, podem ser criados, actualizados e eliminados automaticamente, traduzindo o movimento relativo dos blocos, incluindo deslizamento, rotação e a completa desconexão. Permite assim considerar o comportamento não linear físico e geométrico.

Os blocos podem ser definidos como rígidos, caso em que as juntas desempenham papel preponderante, ou deformáveis, cenário em que a estrutura se caracteriza pelas juntas, mas também pela deformabilidade do elemento bloco. Nesta última hipótese os blocos são discretizados interiormente por uma malha de elementos finitos, sendo esta a opção adoptada no presente estudo.

O MED permite avaliar a estrutura quanto à segurança, determinar a previsível carga de rotura e antever o mecanismo de colapso.

3.2 Características do modelo

O modelo elaborado é constituído por 148 blocos, sendo 65 referentes à abóbada e 83 aos montantes (Fig. 9). Entre as paredes verticais foi considerado um esquema de imbricamento dos blocos, enquanto que nas juntas diagonais da abóbada, os elementos estão dispostos topo a topo.

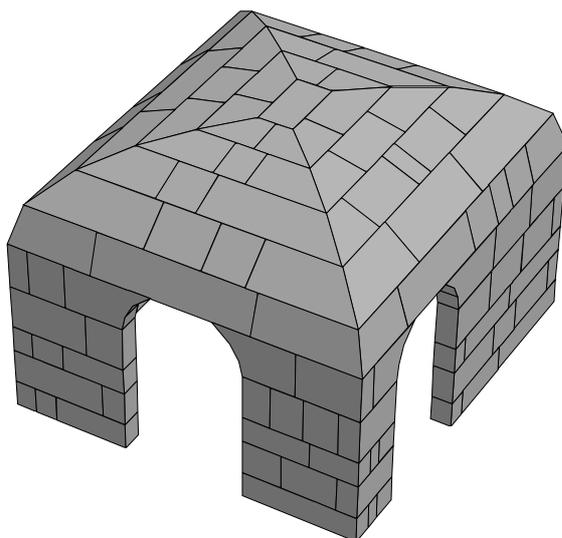


Figura 9 – Modelo numérico da abóbada

A estrutura está enterrada, pelo que houve a necessidade de considerar o efeito estabilizante do solo. A parcela de solo circundante à estrutura, foi modelada com blocos elásticos que se desenvolvem até a superfície (Fig. 10). A zona de solo localizado no extradorso da abóbada, foi simulada através da aplicação de uma carga distribuída equivalente.

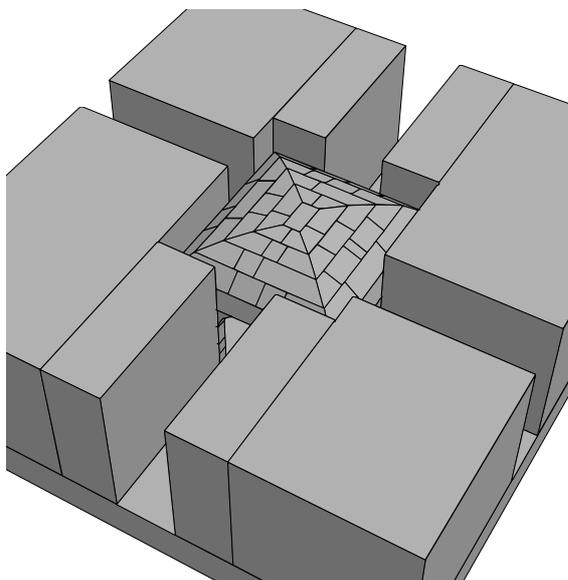


Figura 10 – Modelo numérico com representação do solo e da estrutura de alvenaria

Neste modelo não se considerou a laje de soleira, pois a rotura dá-se invariavelmente pela abóbada e não por qualquer fenómeno que ocorra nas paredes montantes, caso em que a laje de soleira teria alguma influência.

Para aplicação do MED é necessário caracterizar mecanicamente os blocos e as juntas. Os parâmetros que definem os blocos são a densidade (ρ), o módulo de elasticidade (E) e o coeficiente de Poisson (ν) (Tabela 2). Para as juntas, utilizam-se a rigidez normal (K_n), a rigidez tangencial (K_s) e o ângulo de atrito (ϕ) (Tabela 3).

Tabela 2 – Características mecânicas dos blocos

Material	ρ [kg/m ³]	E [MPa]	ν
Calcário	2500	10000	0.2
Solo	2000	100	0.2

Tabela 3 – Características mecânicas das juntas

Material	Kn [MPa/m]	Ks [MPa/m]	ϕ [°]
Pedra-Pedra	10000	10000	35
Pedra-Solo	1000	450	35

Devido à ausência de ensaios experimentais específicos para este estudo, foram utilizados os valores correntes para este tipo de estrutura, com tipologia e constituição semelhantes.

A não linearidade física do modelo é assumida pela adopção do critério de rotura de Coulomb para as juntas, com a definição do ângulo de atrito. Neste caso foi desprezada a parcela coesiva.

As condições de fronteira foram estabelecidas apenas para o bloco da base, constituído por material do tipo Solo, através da fixação das suas faces exteriores. O bloco tem dimensão que se considera suficiente para não interferir no comportamento da estrutura de alvenaria (Fig. 11 e 12).

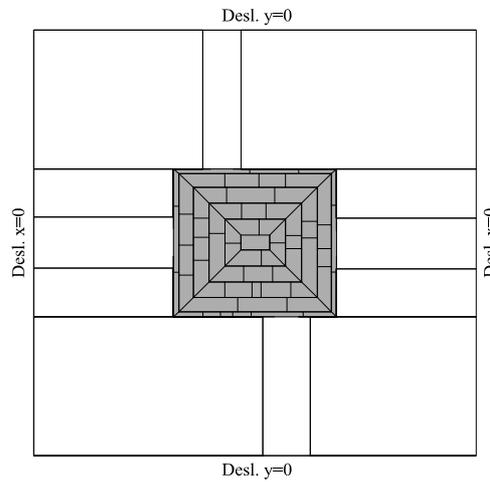


Figura 11 – Condições de fronteira adoptadas: deslocamentos nulos nas direcções x e y

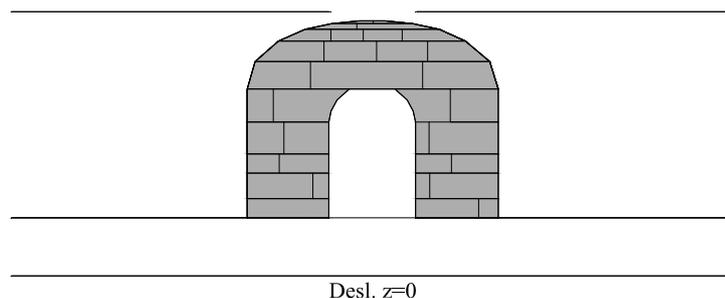


Figura 12 – Condições de fronteira adoptadas: deslocamento nulo na direcção z

3.3 Casos da carga considerados

A análise desta estrutura pelo MED efectuou-se de uma forma iterativa, primeiro foi alcançado o equilíbrio com a aplicação das cargas devidas ao peso próprio e restantes cargas permanentes, sendo posteriormente aplicado um carregamento crescente até ser atingido o colapso devido às sobrecargas solicitantes.

A abóbada está sujeita ao tráfego que circula sob a estrutura, pelo que, para a verificação da segurança, deverão ser consideradas as sobrecargas regulamentares devidas aos veículos. De acordo com o art. 41 do Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes (RSA), tendo em consideração o tipo de trânsito que circula naquela artéria de Lisboa, o carregamento a aplicar será o correspondente ao veículo tipo da Classe I (art. 41.1 do RSA, Fig. 13).

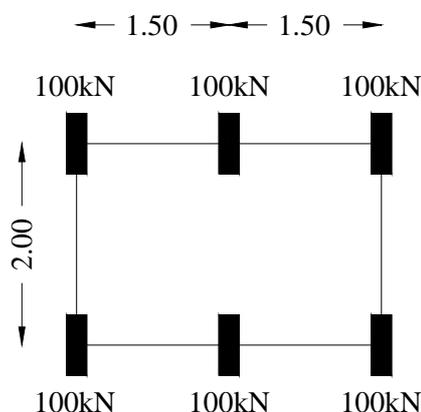


Figura 13 – Veículo tipo considerado (Classe I)

Definido o veículo tipo, foram estabelecidas algumas posições para aplicação das cargas devidas a esta sobrecarga. A aplicação foi efectuada a partir da localização da roda do veículo tipo ao nível do pavimento, sendo depois considerada a degradação de cargas em profundidade até atingir os blocos de alvenaria da abóbada.

O caso mais desfavorável, por ser aquele que apresenta menor degradação de carga, ocorre quando a roda do VT se posiciona sobre o bloco de fecho da abóbada, denominado de Caso de Carga 1 (CG1, Fig. 14), cuja área, em projecção horizontal, é $0,35 \text{ m}^2$.

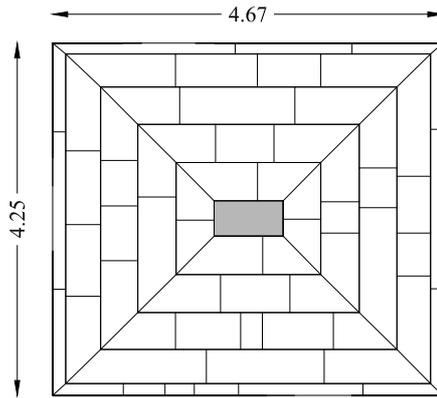


Figura 14 – Caso de carga 1 (CG1), roda do VT sobre o bloco de fecho

Outro caso considerado, Caso de Carga 2 (CG2), corresponde a uma roda do veículo, em posição descentrada, segundo o maior vão (Fig. 15), cuja zona de aplicação de carga tem uma área horizontal de 1,78 m².

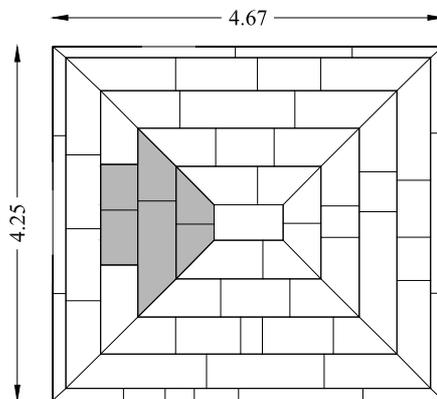


Figura 15 – Caso de carga 2 (CG2), roda descentrada, segundo o maior vão

Foi elaborado um modelo em que se retirou o bloco em falta (Fig. 16), tendo sido aplicadas todas as cargas referidas para o modelo completo.

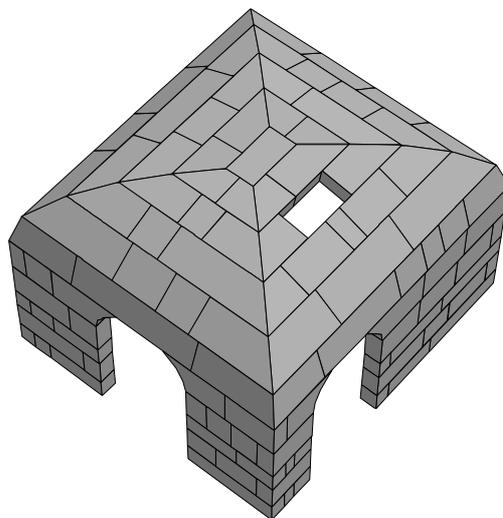


Figura 16 – Identificação do modelo com o bloco em falta

3.4 Análise dos resultados

O valor das cargas que provocam o colapso da abóbada está apresentado na Tabela 4, em função da sua localização.

Tabela 4 – Cargas de colapso devidas ao Veículo Tipo

Casos de carga	Carga de rotura [kN]
Carga sobre o bloco de fecho (CG1)	134
Carga descentrada (CG2)	462

A verificação das condições de segurança em relação ao estado limite último de resistência, deverá ser efectuada para uma combinação de acções fundamentais. Os factores majorativos serão de 1.0 para as cargas permanentes, porque tem um efeito favorável, e de 1.5 para as acções variáveis, correspondentes neste caso ao veículo tipo. Assim, a estrutura deveria ter capacidade resistente para suportar a roda do veículo tipo, majorada por 1.5, que corresponde a $100 \times 1.5 = 150$ kN, depois de aplicadas as cargas permanentes. Analisando os resultados apresentados, verifica-se que a abóbada entra em colapso para uma carga de 134 kN aplicada no bloco de fecho, pelo que não verifica a segurança.

Nas Figuras 17 e 18 apresentam-se os mecanismos de colapso relativos aos casos de carga 1 e 2 respectivamente. Para o CG1 (roda no bloco de fecho), verifica-se que o processo de rotura corresponde a um mecanismo global, antes da desconexão completa do bloco de fecho. No que diz respeito ao CG2 (roda descentrada), a rotura dá-se pelo escorregamento dos blocos que estão solicitados pela roda do veículo tipo.

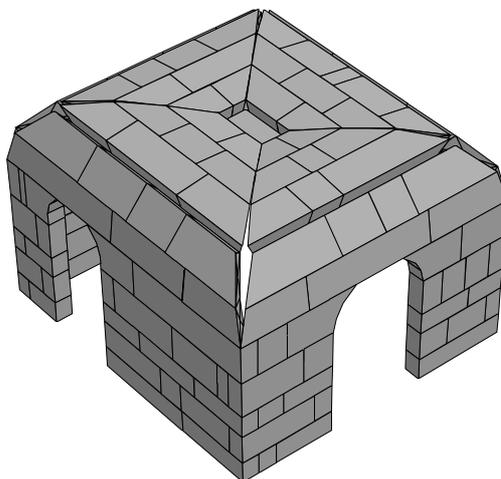


Figura 17 – Mecanismo de rotura para CG1

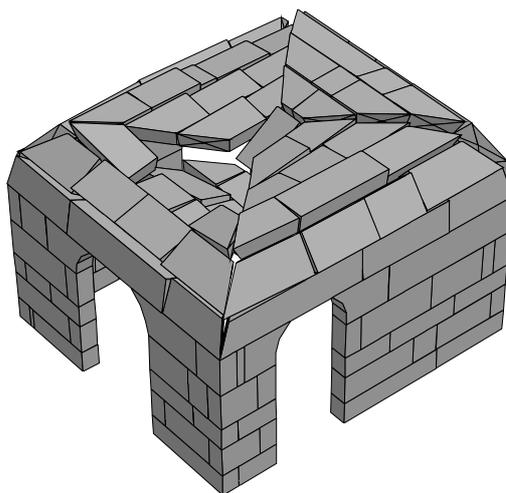


Figura 18 – Mecanismo de rotura para CG2

Os resultados obtidos permitem concluir que a estrutura tem maior capacidade resistente quando solicitada por uma carga descentrada, pois é capaz de mobilizar toda a abóbada, nas duas direcções, estabelecendo um efeito arco 3D. Outro motivo está relacionado com o facto da abóbada ser relativamente abatida, aspecto neste caso favorável, pois a geometria do fluxo de carga que se estabelece, faz com que uma das faces da abóbada trabalhe praticamente em compressão, dando origem a um mecanismo de rotura muito mais sofisticado. Este resultado difere do comportamento apresentado por arcos 2D, mais vulneráveis a carregamentos descentrados, nomeadamente se aplicados a 1/4 do vão.

Em relação ao modelo que considera a ausência do bloco em falta, as análises efectuadas confirmam que, para todos os cenários de carregamento, tanto o valor da carga de rotura como o mecanismo que lhe está subjacente, permanecem inalterados, porém o processo é agora acompanhado de uma instabilidade nos blocos vizinhos. Conclui-se que a ausência do bloco não altera significativamente a capacidade de resistência da estrutura, mas pode causar o colapso, a longo prazo, por desagregação dos blocos adjacentes.

4. PROPOSTA DE REABILITAÇÃO

Perante os dados existentes, não é possível garantir a segurança nas condições actuais, nem em caso de reconstrução da abóbada e substituição dos blocos danificados, pelo que é recomendável uma intervenção que considere o reforço da estrutura.

De entre as várias soluções possíveis, para o aumento da capacidade resistente da abóbada, poderá se propor a execução de uma laje em betão armado que se desenvolve sobre a estrutura e se prolonga por meio de cunhas de transição. Para que os dois materiais, betão e alvenaria, tenham um funcionamento em conjunto, o que é essencial para o bom desempenho estrutural, é necessário garantir uma perfeita ligação entre a laje de betão e os blocos de alvenaria. Esta ligação poderá ser materializada através de uns ferrolhos em aço cravados nos blocos de alvenaria e betonados em conjunto com a laje.

Pretende-se com a solução proposta, aumentar a capacidade resistente das juntas entre os blocos de alvenaria e a compressão nos elementos da abóbada garantindo um maior comportamento de conjunto.

Antes da execução da laje, é necessário proceder a reposição do bloco em falta e a substituição de outros, cujo aspecto indicie alguma deterioração.

A intervenção pretende ser pouco intrusiva, visualmente discreta, sem desvirtuar a função estrutural da abóbada.

Para fins de validação da solução proposta, foi considerado um terceiro caso de carga (CG3), Figura 19, que simula a acção de uma roda do VT, sobre o bloco de fecho, mas agora considerando o efeito de distribuição da carga segundo uma maior área da abóbada, devido a existência da laje de reforço.

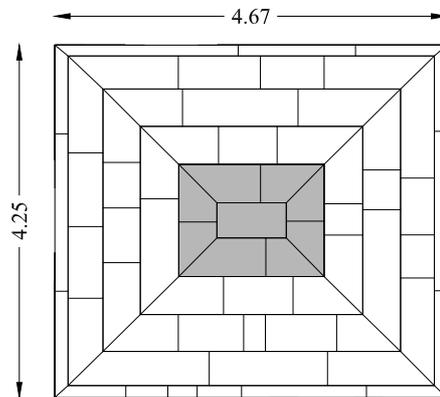


Figura 19 – Caso de carga 3 (CG3): carga sobre zona central

De facto, a carga de rotura passa a ser de 211 kN, pelo já verifica o critério de segurança utilizado. A Figura 20, representa o respectivo mecanismo de colapso.

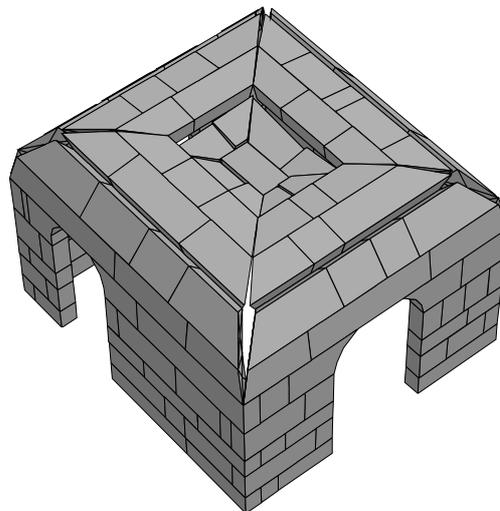


Figura 20 – Mecanismo de rotura para o CG3

Após a intervenção, a estrutura deverá ser submetida a uma fase de observação sob condições normais de funcionamento, através de campanhas periódicas de inspecção visual.

A longo prazo, é fundamental estabelecer um plano de manutenção periódica anual, que preveja acções preventivas e correctivas para situações de infiltração, fadiga e rotura local do material.

5. CONCLUSÕES

Este estudo foi elaborado para avaliar as condições de segurança de uma abóbada de alvenaria de pedra inserida no Aqueduto do Loreto. Foram elaborados modelos numéricos baseados no MED para a avaliação da segurança estrutural da abóbada e foi prevista uma solução de reabilitação e reforço estrutural para a verificação da segurança.

O colapso parcial da estrutura, queda de um bloco e a insegurança aparente da abóbada, deve ter tido origem no facto do nível de compressão dos blocos ser muito baixo, bem como no constante tráfego de veículos naquela artéria de Lisboa. O tráfego de veículos origina uma acção vertical dinâmica importante na estrutura, que provoca uma variação significativa nas tensões de contacto entre os blocos de pedra. Esta acção dinâmica e repetida vai originando deformações apreciáveis, provocando o escorregamento dos blocos de pedra.

A segurança estrutural da abóbada não é garantida através da simples substituição dos blocos de pedra danificados ou inexistentes. É necessário implementar medidas de reforço estrutural. No presente artigo é descrita de uma forma sumária uma possível solução de reforço. A solução passa por garantir um comportamento mais global da abóbada através da implementação de uma laje de betão armado sobre a estrutura. Este elemento de betão tem a função de solidarizar os blocos de pedra garantindo também uma melhor distribuição das cargas aplicadas ao nível do pavimento. No entanto, para que a solução implementada tenha um comportamento satisfatório é necessário que seja garantido uma ligação eficaz entre o betão e as pedras de alvenaria.

Agradecimentos

Os autores agradecem à EPAL – Empresa Portuguesa das Águas Livres, S.A. e à NC – Nova Conservação, Lda.

REFERÊNCIAS

- Itasca, “3DEC – Three-dimensional Distinct Element Code”, Itasca Consulting Group, Minneapolis, USA.
- Lemos, J.V (1997). “Análise da rotura de um arco de alvenaria pelo método dos elementos discretos”, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas, nº 41, pp. 9 – 13.
- Lemos, J.V. (2006). “Discrete Element Modeling of Masonry Structures”, *International Journal of Architectural Heritage*, 1:2, pp. 290 – 213.
- Lourenço, P.B. (2002). “Computations of historical masonry constructions”, *Progress in Structural Engineering and Materials*, 4:3, pp. 301 – 319.