

TÓPICO 4 – Património Histórico

Caracterização experimental do comportamento de elementos estruturais parede-arco do Museu de Santa Joana em Aveiro

Luís Costeira^{1,a}, Arménio Lameiro^{1,b}, Henrique Pereira^{1,c}, Catarina Fernandes^{1,d}, Hugo Rodrigues^{1,e}, Dora Silveira^{1,f}, Humberto Varum^{1,g}, António Arêde^{2,h} e Aníbal Costa^{1,i}

¹Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro, Campus Universitário de Santiago, 3810-193 Aveiro, Portugal

²Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias, s/n, 4200-465 Porto, Portugal

^al.a.costeira@gmail.com, ^barmeniolameiro@ua.pt, ^chenrique.pereira@ua.pt, ^dcfernandes@ua.pt, ^ehrodrigues@ua.pt, ^fdora.silveira@ua.pt, ^ghvarum@ua.pt, ^haarede@fe.up.pt, ⁱagc@ua.pt

Palavras-chave: Caracterização mecânica; Ensaio *in situ* sobre elementos estruturais; Ensaio de compressão sobre carotes; Modelação numérica

Resumo. Com o objectivo de caracterizar o comportamento de elementos estruturais parede-arco do Museu de Aveiro, foram realizados ensaios laboratoriais e *in situ*, com vista ao desenvolvimento e calibração de um modelo numérico. A partir desse modelo foi possível estudar o comportamento deste tipo de elementos quando solicitado por cargas cíclicas. Foi assim possível aprofundar o conhecimento sobre os materiais usados na construção do Museu. Este artigo documenta os procedimentos adoptados e os resultados obtidos, quer dos ensaios, quer do modelo numérico.

1. Introdução

O Museu de Santa Joana (ver Fig. 1), antigo Convento de Jesus, encontra-se localizado no centro de Aveiro fazendo parte do património histórico da cidade. Ao longo dos seus seis séculos de existência, o Museu sofreu diversas intervenções de ampliação e de reorganização dos espaços anteriores, as quais implicaram a introdução de materiais e técnicas construtivas distintos dos originais.

O facto de o Museu estar a ser alvo de obras de reabilitação surgiu como uma excelente oportunidade de proceder ao levantamento dos materiais empregues na sua construção e das técnicas construtivas utilizadas. Foram assim realizadas inspecções visuais ao local, retiradas amostras de material e extraídas carotes para a caracterização dos materiais.

Com o objectivo de caracterizar o comportamento de elementos estruturais parede-arco do Museu quando solicitado, nomeadamente, por cargas cíclicas, foi realizado um ensaio *in situ* sobre um destes elementos. O ensaio cíclico consistiu em sujeitar o pórtico de alvenaria de pedra a uma solicitação horizontal, medindo a intensidade da força aplicada e os deslocamentos em vários pontos da superfície da parede-arco.

Em laboratório foram realizados ensaios de compressão que permitiram obter um valor aproximado das propriedades mecânicas dos materiais que constituem as paredes. As amostras recolhidas *in situ* e as obtidas a partir de um bloco transportado para o laboratório, correspondente à base da parede-arco que foi demolida, foram submetidas a uma carga aplicada nos topos, medindo-se simultaneamente a sua deformação axial. Partindo dos diagramas tensão-extensão para cada amostra foi possível estimar o módulo de elasticidade.

Tendo por base os resultados dos ensaios laboratoriais e *in situ*, foi desenvolvido e calibrado um modelo numérico do elemento parede-arco ensaiado, e feita a comparação entre os resultados numéricos e os resultados experimentais.



Figura 1: Museu de Aveiro

2. Descrição dos elementos existentes

Nas inspeções visuais realizadas, verificou-se que os elementos verticais do Museu são de alvenaria e, em certos pontos, eram evidentes intervenções mais recentes que, pelo tipo de materiais usados, presume-se que datem dos anos 30 ou 40 do séc. XX. Como acontece na generalidade das construções antigas, neste edifício as paredes de alvenaria assumem-se como os elementos estruturais de maior importância [1, 2].

Os materiais encontrados, quer nas paredes, quer nos arcos e pilares, são na sua grande maioria pedras naturais. No interior destes elementos existem diversos tipos de pedras das mais variadas dimensões, verificando-se a abundância de granito, basalto e pedra de Eiol, pedras com grande tradição de utilização na zona Norte e Centro do país [3, 4].

No que diz respeito às paredes, estas são constituídas por grandes pedras de granito ligadas entre si com juntas de argamassa [5]. As divisórias mais recentes, que datam do início do séc. XX, são de alvenaria de tijolo furado. Já nos pilares e arcos encontram-se, no seu contorno, ladrilhos cerâmicos de cerca de 3cm de espessura, de aparência similar à do tijolo burro, e o enchimento feito com pedras naturais, mas de dimensões inferiores às usadas nas paredes (ver Fig. 2).



Figura 2: Constituição dos pilares e dos arcos do Museu de Aveiro

3. Ensaio experimental

3.1 Procedimento e esquema de monitorização

Após a selecção do arco a ensaiar (ver Fig. 3), a zona do pilar foi perfurada a uma altura de 2.545 m. Por esse orifício fez-se passar um cabo de aço que, de um lado da parede foi fixado a um barrote de madeira que serviu para distribuir a carga por uma maior área e, do outro lado engatou na célula de carga. A célula de carga, por sua vez, foi fixada a um dispositivo mecânico através do qual era feita a aplicação da força. Na outra extremidade do sistema de aplicação de força fez-se passar um cabo de aço que foi ancorado à parede exterior do compartimento (ver Fig. 4).



Figura 3: Elemento parede-arco em estudo



Figura 4: Sistema de aplicação e medição da força

A monitorização de força e deslocamentos foi realizada com recurso a equipamento do Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da FEUP. Para o registo dos deslocamentos foram instalados vários transdutores eléctricos do tipo LVDT (Linear Variable Displacement Transformer) no elemento, de acordo com o esquema ilustrado na Fig. 5.

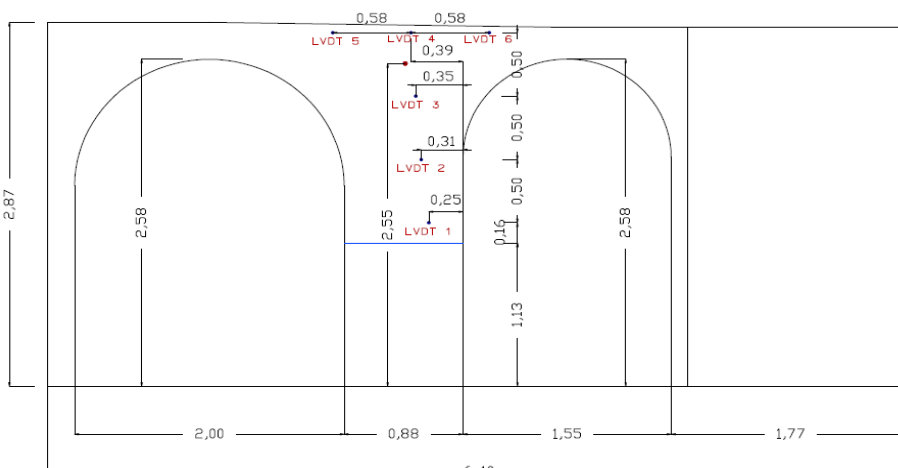


Figura 5: Localização dos deflectómetros (face Nascente)

Com recurso a um sistema de aquisição de dados baseado num equipamento do tipo PXI-SCXI da National Instruments, foi possível fazer a leitura instantânea e contínua dos valores de força e dos deslocamentos induzidos ao longo do ensaio (ver Fig. 6). O ensaio consistiu em três ciclos carga-descarga sem inversão de sinal.



Figura 6: Sistema de aquisição de dados

3.2 Resultados experimentais

Na Fig. 7 é apresentado o gráfico força-deslocamento correspondente ao ponto onde estava instalado o LVDT4 (ver Fig. 5).

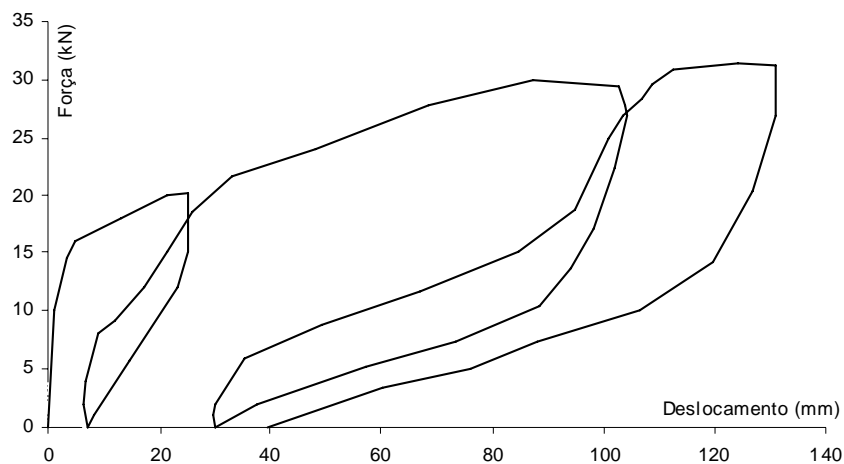


Figura 7: Curva força-deslocamento obtida

Nas Figs. 8 e 9 são representados os deslocamentos horizontais em planta e para um corte da secção do arco segundo a vertical.

Na Fig. 8 representa-se o perfil horizontal de deslocamentos. A observação do diagrama aponta para a ocorrência de alguma torção para uma solicitação de 20kN, o que indica que as paredes perpendiculares aos arcos ainda lhes conferiam alguma resistência. Isto poderá também ser justificado pela heterogeneidade dos elementos.

Na Fig. 9 são representados os deslocamentos horizontais em corte de uma secção do arco segundo a vertical. O diagrama traduz a relação entre a altura a que se encontra cada comparador e os deslocamentos horizontais por eles medidos, para as três séries de carregamentos, 10, 20 e 30 kN.

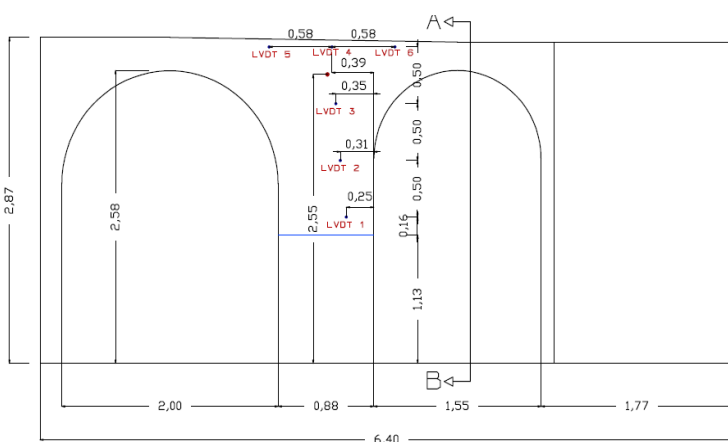
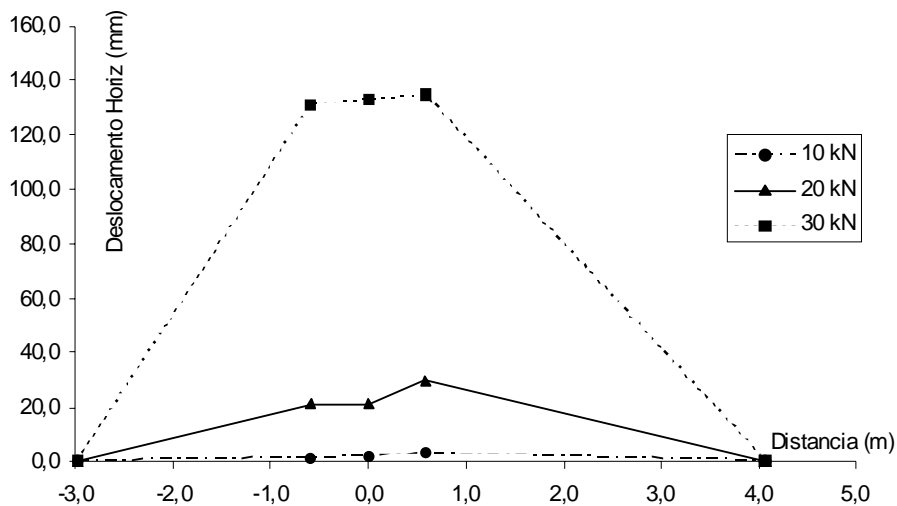


Figura 8: Perfil de deslocamentos horizontais

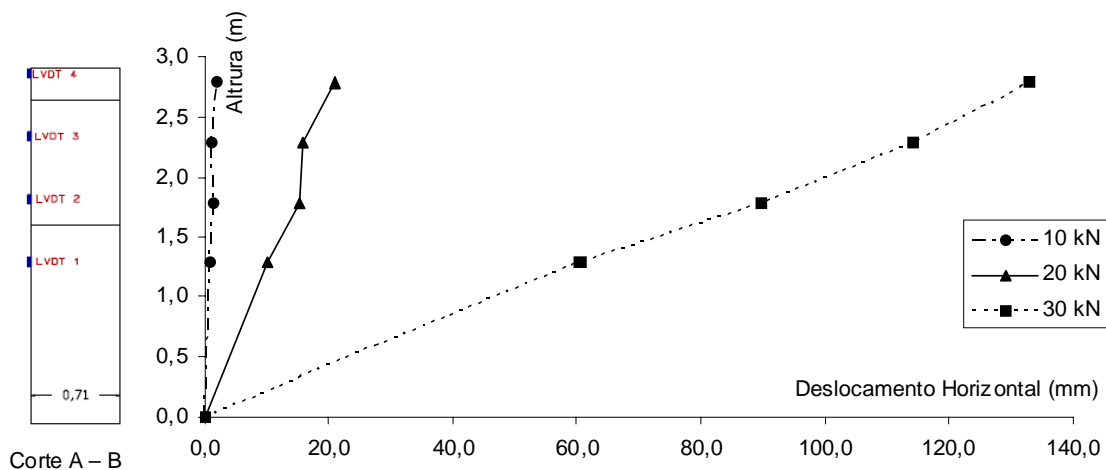


Figura 9: Perfil de deslocamentos horizontais medidos no LVDT4

O módulo de elasticidade do elemento parede-arco pode ser calculado de várias formas.

Para um carregamento de 10 kN, correspondente a uma fase ainda em regime elástico, o cálculo do módulo elasticidade do elemento foi feito considerando o método da unidade fictícia de carga (Teorema de Castigliano), recorrendo ainda ao Método do Prof. Bonfim Barreiros para o cálculo integral de um produto de duas funções, uma delas linear. Desenvolvendo a fórmula dada pelo Método de Castigliano é possível determinar o módulo de elasticidade [6, 7]. Assim:

$$\delta = \frac{F_{10} \times L^3}{3 \times I \times E} \Leftrightarrow E = \frac{F_{10} \times L^3}{3 \times I \times \delta} . \quad (1)$$

$$E = \frac{F_{10} \times L^3}{3 \times I \times \delta} = \frac{10000 \times 2790^3}{3 \times 2.6 \times 10^{10} \times 1.3} = 2141.77 \text{ MPa} . \quad (2)$$

A rigidez do pilar é dada por:

$$K = \frac{3 \times E \times I}{L^3} . \quad (3)$$

em que F corresponde à força aplicada no cabo de aço (N), I é o momento de inércia do pilar (mm^4), L é a altura do comparador LVDT4 ao piso (mm), K é a rigidez do pilar; δ é o deslocamento horizontal (mm), e E é o módulo de elasticidade (MPa).

Logo:

$$K = \frac{F_{10}}{\delta} = \frac{10000}{1.3} = 7692.3 \text{ N/mm} . \quad (4)$$

No instante em que o elemento entra em regime plástico, o seu momento de inércia começa a diminuir devido à fissuração da secção, o que leva à diminuição da secção e da rigidez da parede-arco. Para as forças de 20 e 30 kN a rigidez vai diminuindo, ocorrendo o maior decréscimo na transição do regime elástico para o regime plástico [8].

$$F_{20} = K \times \delta \Leftrightarrow K = \frac{F_{20}}{\delta} = \frac{20000}{20.8} = 961.5 \text{ N/mm} . \quad (5)$$

$$F_{30} = K \times \delta \Leftrightarrow K = \frac{F_{30}}{\delta} = \frac{30000}{131.2} = 228.6 \text{ N/mm} . \quad (6)$$

4. Ensaio de caracterização mecânica da alvenaria

4.1 Extracção, preparação e ensaio de amostras

Para uma melhor compreensão dos materiais encontrados e da forma como estes estão dispostos no interior das paredes, procedeu-se à extracção de carotes. A extracção foi feita *in situ* numa parede (Fig. 10), e também em laboratório num bloco recolhido no local (Fig. 11).



Figura 10: Extracção de carotes *in situ*



Figura 11: Extração de carotes na base de um pilar

As carotes extraídas, depois de devidamente identificadas, foram deixadas a secar por algum tempo, às condições normais de temperatura e de humidade (Fig. 12). Após a secagem os topos foram rectificadas para a regularização das faces e, já com a forma e dimensão final, procedeu-se à medição da altura, diâmetro e peso das carotes a serem ensaiadas.



Figura 12: Rectificação das carotes

Foram então realizados ensaios de compressão axial. Foi utilizado um anel de carga de 250 kN, podendo este ser subdividido em 50 kN e 125 kN. No que diz respeito à velocidade de ensaio, não existindo quaisquer referências, adoptou-se um valor de 0.5 mm/m (Fig. 13) [9,10].



Figura 13: Ensaio de compressão axial das carotes

4.2 Resultados dos ensaios de compressão

A partir do ensaio de compressão axial obtiveram-se gráficos força-deslocamento. Os valores da força aplicada (kN) foram corrigidos tendo em conta as dimensões de cada carote. Os factores de correcção usados foram os dados pela norma ASTM C 42/C 42M – 99 para o betão, uma vez que não há qualquer referência normativa para alvenaria de pedra natural. Segundo a norma, os factores de correcção a usar, em função das dimensões da amostra, são os apresentados na Tabela 1.




Tabela 1: Factor de correcção da força aplicada [4]

Razão L/D	Factor de correcção da força aplicada
1.75	0.98
1.50	0.96
1.25	0.93
1.00	0.87

Para uma razão L/D igual a 2.00, ou seja, quando a altura do provete corresponde ao dobro do seu diâmetro, considerou-se que o factor de correcção da força aplicada era igual à unidade. Para valores de L/D inferiores a 1.00, fez-se a extrapolação do factor de correcção.

Através dos diagramas tensão-extensão obtidos, determinou-se o módulo de elasticidade do provete. Na Tabela 2 são apresentados a identificação fotográfica, as dimensões, o valor do peso volúmico, a tensão de rotura e o valor do módulo de elasticidade de algumas das carotes.

Tabela 2: Propriedades mecânicas das carotes

Amostra		Diâmetro (m)	Altura (m)	Peso Vol. Aparente (kN/m ³)	Tensão de Rotura (MPa)	Módulo de Elasticidade (MPa)
MABP4A		0.143	0.174	20.519	7.730	88.889
MABP6		0.143	0.301	21.803	5.913	114.286
MABP7		0.143	0.300	19.389	5.168	150.000

5. Modelação numérica

5.1 Modelo numérico da parede-arco

A fim de melhor compreender o comportamento da parede-arco ensaiado, que por sua vez permite um conhecimento do comportamento geral do edifício, foi desenvolvido um modelo numérico no programa de análise estrutural SAP2000 [11]. Para tal, foram adoptados elementos de área rectangulares e triangulares na realização da malha, o que permitiu uma melhor aproximação à forma real da estrutura.

No que diz respeito à leitura dos deslocamentos, fizeram-se coincidir os vértices dos elementos de área com a localização dos LVDT's, o que facilitou a leitura dos deslocamentos nesses pontos e a comparação com os deslocamentos reais medidos durante o ensaio. O mesmo ocorreu com o ponto onde foi aplicada a força no arco.

O modelo da parede-arco foi encastrado na base para simular a ligação à fundação. Tanto a parede-arco como as paredes laterais foram consideradas como sendo elementos de casca grossa, com a espessura correspondente. Na definição do material recorreu-se ao peso volúmico médio aparente, calculado a partir das carotes.

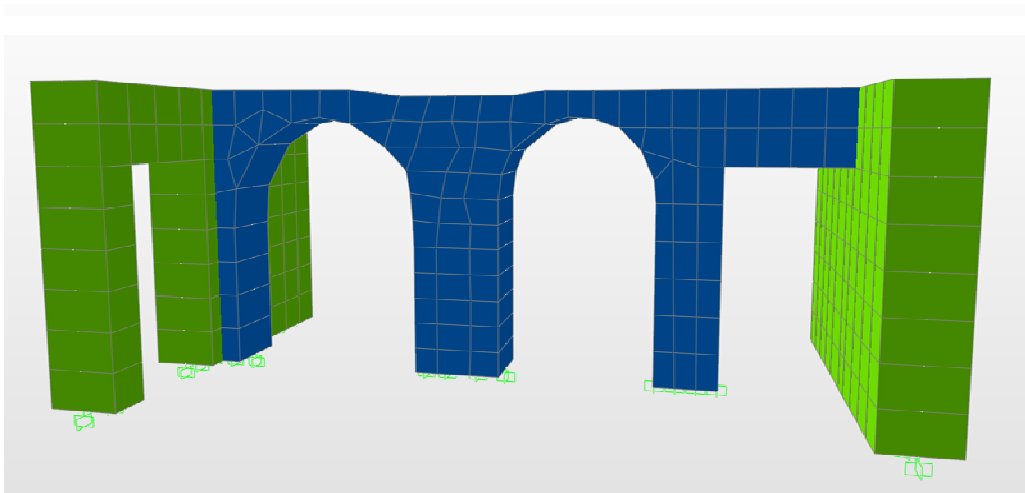


Figura 14: Modelo numérico

5.2 Calibração do modelo numérico

O processo adoptado para a calibração do modelo numérico consistiu em fazer variar o módulo de elasticidade para que a deformação no ponto do LVDT4 coincidissem com o deslocamento medido no ensaio cíclico, sendo assim possível comparar o módulo de elasticidade médio ajustado através da modelação com o módulo de elasticidade médio calculado através do ensaio à compressão das carotes. Para o cálculo do módulo de elasticidade do modelo, foi considerada a aplicação de uma força de 10.04 kN, que provoca um deslocamento de 2.04 mm do LVDT4. Aplicando ao modelo uma combinação que considerasse o peso próprio e a força de 10.04kN, calculou-se um módulo de elasticidade que correspondesse a um deslocamento no LVDT4 de 2.04 mm. Este processo conduziu assim a uma estimativa do módulo de elasticidade global de 310 MPa. Esta modelação numérica corresponde a um comportamento elástico linear, não sendo o comportamento real da estrutura, uma vez que esta tem um comportamento não linear para deformações superiores. Nas Figs. 15 e 16 é feita a comparação entre os resultados experimentais e os resultados do modelo numérico, para a aplicação de uma força de 10.04 kN.

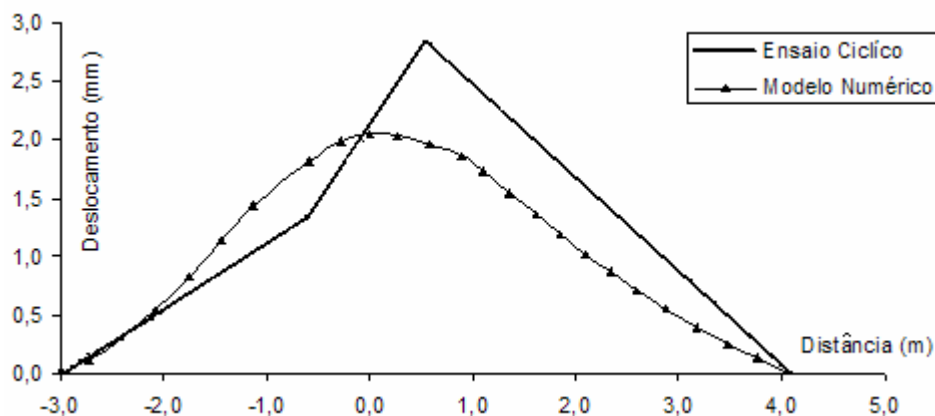


Figura 15: Representação em planta do deslocamento de vários pontos do elemento

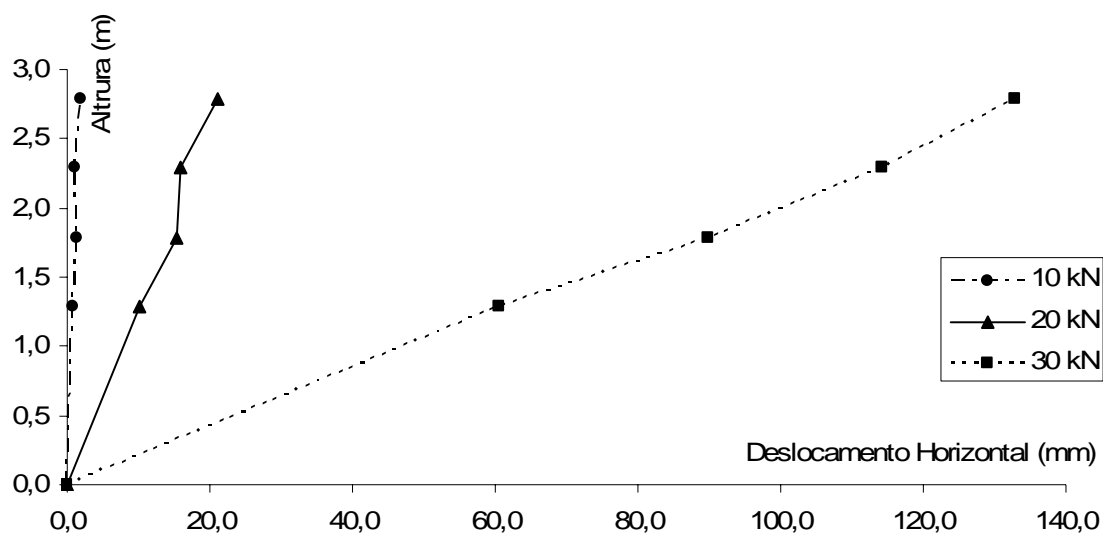


Figura 16: Representação em perfil do deslocamento de vários pontos do elemento

6. Considerações finais

Através de uma análise cuidada dos resultados obtidos, dos vários materiais constituintes da parede e do seu método construtivo, é possível uma modelação mais realista do seu comportamento.

A informação obtida para o modelo à escala real através da realização do ensaio cíclico, permite construir uma boa base de conhecimento no que diz respeito a elementos de características semelhantes, que datem da mesma época, integrem edifícios da mesma região e tenham sido construídos de modo semelhante.

Relativamente aos valores das propriedades dos materiais usados nestas alvenarias tradicionais, verificou-se que o valor de módulo de elasticidade obtido pelo modelo numérico, 310 MPa, é consideravelmente superior ao obtido através do ensaio de compressão das amostras de material (ver Tabela 2). Esta diferença poder-se-á dever à diferença de confinamento do material *in situ* e das amostras ensaiadas, para além do efeito do transporte e recolha das carotes, assim como a dificuldades de leitura de deformações nos ensaios das carotes. Outra possível causa prende-se com o facto de a análise do modelo numérico ter sido do tipo linear elástica. Apesar da heterogeneidade do material, o peso volúmico de cada carote nunca se afastou significativamente do valor médio desta propriedade.

Comparando as curvas de deslocamento do modelo numérico com as do ensaio cíclico, verificou-se que a curva do modelo traduz uma maior simetria de deslocamentos, relativamente ao ponto de aplicação da força. Contrariamente, a curva de deslocamentos do ensaio cíclico chega a evidenciar alguma rotação. Como possíveis causas para essa diferença de comportamento das curvas de deslocamento tem-se a reorganização interna dos materiais constituintes da parede-arco, devido à aplicação da força, mas também o facto de já existirem danos estruturais no elemento antes do ensaio.

Agradecimentos

Este artigo refere investigação realizada com o apoio financeiro da FCT, Fundação para a Ciência e a Tecnologia, Portugal.

Os autores agradecem todo o apoio prestado e informação cedida para a elaboração deste trabalho à Dra. Ana Margarida Ferreira, ao Dr. José António Cristo, aos restantes funcionários do Museu e à construtora ACF por todos os meios disponibilizados.

Referências

- [1] F. Pagaimo: *Caracterização morfológica e mecânica de alvenarias antigas: Caso de estudo da vila histórica de Tentúgal*, Tese de Mestrado, Universidade de Coimbra, Portugal (2004).
- [2] P. Lourenço, F. Pagaimo e E. Júlio: *Caracterização das paredes de alvenaria da vila de Tentúgal*, Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas (RPEE) N.º 51, Portugal (2005).
- [3] J. Roque e P. Lourenço: *Caracterização Mecânica de Paredes Antigas de Alvenaria. Um Caso de Estudo no Centro Histórico de Bragança*, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho, Portugal (2003).
- [4] Standard AASHTO: *ASTM C 42/C 42M - 99 Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete*, AASHTO No.: T2 (1999).
- [5] L. Franco: *Paredes de alvenaria: características e propriedades*, Escola Politécnica da USP PCC 2515 – Alvenaria Estrutural.
- [6] A. C. Reis, M. Brazão Farinha e J. S. B. Farinha: *Tabelas Técnicas*, Edições Técnicas (2005).
- [7] V.D. Silva: *Mecânica e Resistência dos Materiais*, 3ª Edição, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra, Portugal (2004).
- [8] G. Vasconcelos e P. Lourenço: *Análise experimental do comportamento de paredes de alvenaria de pedra não reforçada sob ações cíclicas no plano*, SÍSMICA 2004 – 6º Congresso Nacional de Sismologia e Engenharia Sísmica, Guimarães, 14-16 Abril 2004, Portugal (2004).
- [9] IPQ e N. E.: *Métodos de ensaio para pedra natural. Determinação da resistência à compressão* (2000).
- [10] A. S. Coutinho e A. Gonçalves: *Fabrico e Propriedades do Betão*, LNEC, Portugal, Vols. I, II e III (1995).
- [11] *SAP2000 Nonlinear*, Computer and Structures, Inc. (2007).
- [12] L. Costeira e A. Lameiro: *Relatório Final da cadeira de Projecto: Reabilitação do Museu de Santa Joana em Aveiro*, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro, Portugal (2007).
- [13] J. Roque e P. Lourenço: *Técnicas de intervenção estrutural em paredes antigas de alvenaria*, Construção Magazine (7), pp. 4-10, Portugal (2003).
- [14] M. Quaresma: *Museu de Aveiro – Um Projecto Sempre em Marcha*, AMUSA, Portugal (1991).
- [15] D. Oliveira, P. Lourenço e P. Roca: *Comportamento Experimental de Muros de Pedra Sujeitos a Esforços de Compressão e Corte*, Encontro Nacional sobre Conservação e Reabilitação de Estruturas, pp. 345-354 (2000)
- [16] *Regulamento de Segurança e Acções para Estruturas de Edifícios e Pontes*, DL 235/83, Porto Editora, Portugal (1983).
- [17] <http://www.av.it.pt/aveirocidade/pt/monumentos/monu10.htm>
- [18] <http://www.av.it.pt/aveirocidade/pt/monumentos/monu10.htm>