

# **“BOX-CULVERTS” SOB ATERROS DE ALTURA ELEVADA: ANÁLISE DOS EFEITOS DE INTERACÇÃO SOLO - ESTRUTURA**

## **“BOX-CULVERTS” UNDER HIGH EMBANKMENTS: ANALYSIS OF THE SOIL-STRUCTURE INTERACTION MECHANISMS**

Alves Costa, Pedro, *FEUP, Porto, Portugal, pacosta@fe.up.pt*  
Pimentel, Mário, *LABEST/FEUP, Porto, Portugal, mjsp@fe.up.pt*  
Félix, Carlos, *LABEST/ISEP, Porto, Portugal, cfelix@fe.up.pt*  
Figueiras, Joaquim, *LABEST/FEUP, Porto, Portugal, jafig@fe.up.pt*

### **RESUMO**

As “box-culverts” (BC) pré-fabricadas são estruturas enterradas com grande aplicabilidade na materialização de atravessamentos de aterros em obras viárias ou na construção de galerias técnicas em centros urbanos. O presente artigo pretende contribuir para a compreensão do comportamento deste tipo de estruturas, identificando os mecanismos de interacção solo/estrutura e avaliando a influência de diferentes parâmetros no desenvolvimento dos mesmos, nomeadamente os relacionados com a qualidade da compactação do aterro, com o tipo fundação e com a pormenorização das BC. Para o efeito é utilizado um modelo numérico devidamente validado com resultados de uma campanha experimental. Os resultados obtidos indicam que as pressões a que as BC estão sujeitas se afastam significativamente das previstas pelo método simplificado de dimensionamento correntemente utilizado. Por último, são apresentadas algumas recomendações relativas ao dimensionamento e pormenorização de BC sob aterros elevados.

### **ABSTRACT**

Precast reinforced concrete box-culverts (BC) are widely used structures to provide an economical construction system for crossing highway embankments or technical galleries in urban places. The aim of the present paper is to contribute for a better understanding of the behaviour of this kind of structures, identifying the soil/structure interaction mechanisms and considering the influence of several parameters, namely the compactation of the embankment; the foundation of the structure and the non-linear behaviour of the BC. Numerical analyses were performed and the results were validated by comparison with an experimental test. The results provided show that the pressures reaching the BC are significantly different from the pressures estimated by usual design methodologies. Some recommendations about the design of BC's under high embankments are presented.

### **1. INTRODUÇÃO**

As “box-culverts” (BC) pré-fabricadas são estruturas enterradas com grande aplicabilidade na materialização de atravessamentos de aterros em obras viárias ou na construção de galerias técnicas em centros urbanos. Estas caracterizam-se pela sua simplicidade de construção, facilidade de transporte e colocação, potencializados pela repetição de elementos de pequeno desenvolvimento longitudinal. No entanto, a existência de uma estrutura enterrada e o processo construtivo necessário à sua instalação, levam ao surgimento de complexos efeitos de migração e redistribuição de tensões no aterro, o que dificulta a estimativa da acção a que a estrutura

estará sujeita através de metodologias simplificadas. A ocorrência de diversas avarias neste tipo de estruturas quando instaladas sob grandes alturas de aterro corroboram as dificuldades apontadas (Pimentel et al. 2006, Pimentel et al. 2008).

Apesar de os primeiros trabalhos incidindo sobre as pressões actuantes em passagens enterradas datarem do início do século passado (Marston e Anderson 1913, Marston 1930 e Sprangler 1950), constando de estudos teóricos e experimentais em tubos enterrados, os mecanismos de interacção solo/estrutura são muitas vezes desprezados nas metodologias correntes de dimensionamento de BC's, considerando-se que as pressões actuantes sobre a travessa são iguais ao peso do prisma de solo sobrejacente à mesma. Na sequência dos estudos preliminares levados a cabo por Marston e Sprangler relativos a tubos metálicos enterrados ficou evidenciada a existência de mecanismos de interacção solo-estrutura e como tal, dependentes das propriedades e condições de instalação do tubo e das propriedades do solo. Convém no entanto ressaltar que os estudos efectuados se referiam a tubos metálicos, cujo comportamento estrutural difere em muito das actuais BC em betão armado. Mais recentemente, novos estudos experimentais já relativos a BC's em betão armado foram desenvolvidos por Dasgupta e Sengupta (1991), Figueiras et al. (2001), e Bennett et al. (2005), nos quais é possível identificar a existência de mecanismos de migração e transferência de tensões no solo circundante à estrutura, revelando que a acção total sobre a travessa superior da BC pode ser bastante superior ao peso do prisma de terras sobrejacente. Com base em estudos numéricos, Tadros et al. (1989) e Kim e Yoo (2005) mostraram a influência das condições de fundação e do processo de instalação da estrutura (em aterro ou em trincheira) sobre as pressões exercidas na BC.

Na regulamentação internacional é possível encontrar algumas recomendações acerca de metodologias para o dimensionamento de BC's. Merecem especial relevo as disposições da AASHTO (2002), que recomendam a multiplicação do diagrama de pressões sobre a travessa superior por um factor de interacção dependente das condições de instalação. Este factor de interacção, definido como o rácio entre a força vertical total aplicada pelo solo sobre a travessa e o peso do prisma de aterro sobrejacente à travessa, traduz de uma forma global o efeito dos mecanismos de interacção solo/estrutura nas pressões do aterro sobre a box. No caso de uma instalação em aterro o factor de interacção vem dado por:

$$F_c = 1 + 0,20 \frac{H}{B_c} \quad (1)$$

em que H é a altura de aterro sobre a travessa superior e  $B_c$  é a largura da BC. O factor de interacção vem limitado a 1,15 ou 1,40, conforme o aterro lateral seja compactado ou não compactado, respectivamente.

Neste trabalho apresenta-se um estudo numérico e experimental sobre o comportamento de BC's em betão armado. Uma BC sob um aterro de 9,5 m foi instrumentada e observada durante o período de construção. Foram efectuadas análises numéricas com um programa de elementos finitos capaz de considerar o comportamento não linear do solo, das interfaces solo/estrutura e do betão armado, reproduzindo os fenómenos de fissuração, esmagamento do betão e cedência das armaduras, assim como todo o faseamento construtivo. Estes são aspectos fundamentais para uma simulação realista dos fenómenos de interacção solo/estrutura. Após calibração dos resultados experimentais com os resultados numéricos foi desenvolvido um estudo paramétrico para identificar os parâmetros que mais influenciam os mecanismos de interacção e para avaliar o desempenho estrutural das BC's até à rotura.

## 2. CAMPANHA EXPERIMENTAL

A obra seleccionada é uma passagem hidráulica numa auto-estrada em que são utilizados elementos pré-fabricados de betão, com secção transversal interior de  $2,00 \times 2,00 \text{ m}^2$ , exterior de  $2,32 \times 2,50 \text{ m}^2$  e comprimento unitário de 2,50 m. A meia altura dos montantes existe uma rótula. Longitudinalmente a obra apresenta um desenvolvimento total de 125,0 m. A altura total de aterro sobre a BC, que varia com a inclinação longitudinal da passagem hidráulica (PH) e com a sobrelevação da plataforma da AE, apresenta valores máximos próximos de 10,0 m. Na Figura 1 ilustram-se a geometria e as armaduras da BC.

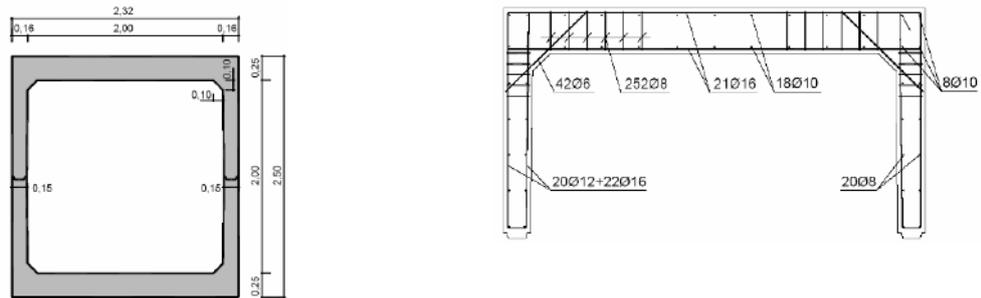


Figura 1 – Geometria e armaduras da BC analisada.

Uma secção transversal da BC foi instrumentada, medindo-se em diversos pontos dessa secção as deformações no betão e as pressões impostas pelo material de aterro. O plano de observação compreendeu também a medição de deformações e medição de temperaturas ambiente no interior da BC e no interior do aterro. No entanto, na presente comunicação apenas se vai efectuar a análise da evolução das pressões de terras e a sua reprodução pelo modelo numérico.

Na Figura 2 apresenta-se um esquema da localização das células de pressão e uma fotografia da secção instrumentada, respectivamente.

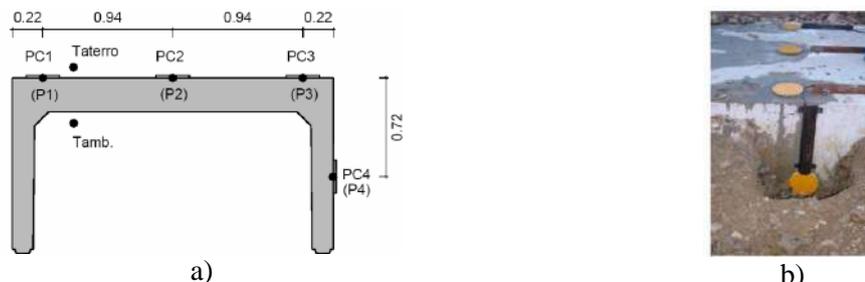


Figura 2 – Instrumentação da BC: a) Localização das células de carga; b) Fotografia de células de carga.

Na Figura 3 ilustra-se a evolução da altura de aterro medida por meios topográficos e a evolução temporal das pressões de terras medidas nas diferentes células de carga.

A análise da Figura 3 permite constatar que as pressões de terras junto aos montantes, ou seja os resultados medidos nas células de carga P1 e P3, são substancialmente maiores do que as verificadas na célula P2, correspondente ao meio vão da travessa. A tensão geoestática,  $\sigma_v = \gamma \square H$ , calculada para um peso volúmico do solo de  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ , equivale a 190 kPa, valor substancialmente inferior ao medido sobre os montantes e ligeiramente superior ao registado sobre o meio vão da travessa. É ainda de referir que, apesar da altura de aterro se manter constante, as tensões medidas continuaram a evoluir, conforme se constata na análise da figura.

Este facto pode ser devido a variações de temperatura na BC, dado que a dilatação da BC está parcialmente impedida pelo aterro envolvente ou a rearranjos do solo devidos à circulação na plataforma.

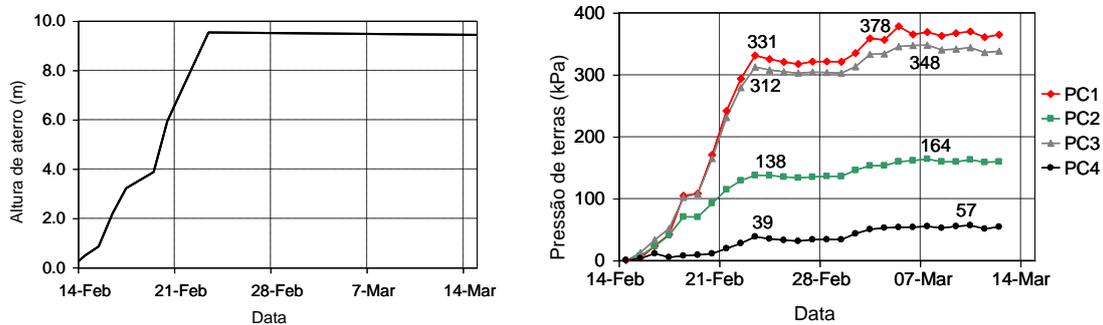


Figura 3 – Evolução da construção do aterro: a) altura do aterro versus tempo; b) pressões de terra versus tempo.

### 3. MODELAÇÃO NUMÉRICA

#### 3.1. Descrição do modelo

O modelo numérico utilizado foi já descrito noutros trabalhos, nomeadamente em Pimentel et al. (2006), pelo que se dispensa a sua apresentação detalhada. Basicamente trata-se de um modelo baseado no método dos elementos finitos, tendo o solo sido modelado considerando um estado plano de deformação e a BC considerando um estado plano de tensão, dada a existência de juntas entre os elementos de 2,5 m de desenvolvimento. Entre os elementos de solo e os elementos de betão que constituem a BC foram colocados elementos de junta para reproduzir o carácter friccional da interface entre os dois materiais. Para o solo adoptou-se um modelo elástico-perfeitamente plástico, com envolvente de rotura de Mohr-Coloumb, tendo-se considerado um ângulo de atrito,  $\phi' = 30^\circ$  e ângulo de dilatância,  $\psi = 0$ . Para o betão foi adoptado um modelo de fendilhação distribuída. Para mais pormenores sobre o modelo de betão consultar Pimentel (2004).

A malha de elementos finitos adoptada está ilustrada na Figura 4, assim como os valores das propriedades consideradas para os materiais. Foi considerado um eixo de simetria vertical, um maciço de fundação subjacente à BC com uma possança de 1,0 m e o aterro foi dividido em 16 camadas para modelação do processo construtivo, 10 das quais sobre a BC.

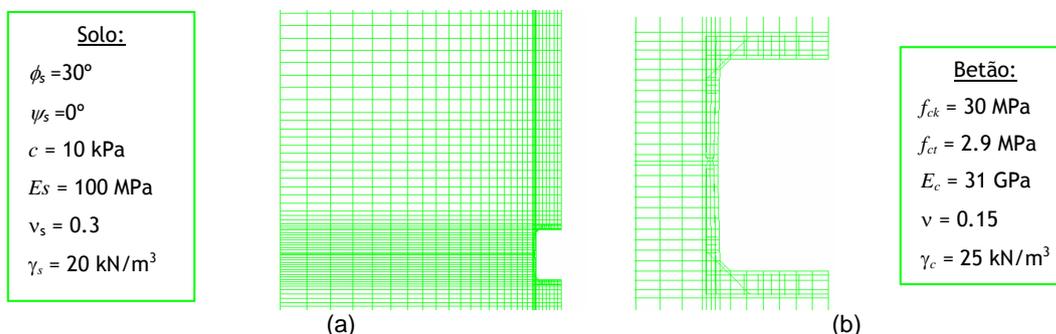


Figura 4 - Malha de elementos finitos e propriedades dos materiais na Análise A1: a) vista geral da malha; b) detalhe da malha na zona da BC.

### 3.2. Validação do modelo

Nesta secção pretende-se averiguar o desempenho do modelo numérico na avaliação das pressões exercidas sobre a BC. Para o efeito foram consideradas 4 conjuntos de parâmetros descrevendo o solo de aterro, dado ser neste material que existem mais incertezas quanto à sua caracterização. Os resultados de um estudo paramétrico prévio permitiram também concluir que são os parâmetros ligados à deformabilidade do solo que têm mais influência no comportamento do sistema, pelo que nas análises aqui apresentadas se fez variar o valor do módulo de deformabilidade do solo, Es. Para análise de base, a análise A1, foram considerados os parâmetros indicados na Figura 4. Note-se que foram tomados valores característicos para as propriedades do betão e do aço correspondentes a um C30/37 e a um A500, respectivamente. Nas restantes análises efectuadas foram consideradas as propriedades indicadas na Figura 5. Na análise A2 foram consideradas propriedades uniformes para o solo, tendo-se considerado um aterro mais deformável através da adopção de um módulo de deformabilidade mais baixo. Nas análises A3 e A4 foram consideradas propriedades distintas conforme a zona do aterro, ver Figura 5. Na análise A3 considerou-se a existência de uma fundação rígida (“bed-rock”) e na análise A4 a existência de uma região no aterro lateral não compactada, para a qual se tomou um módulo de deformabilidade mais baixo.

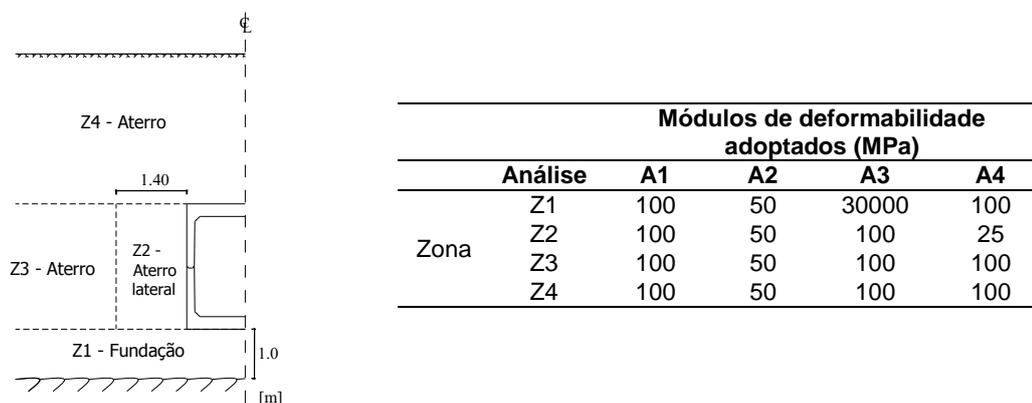


Figura 5- Geometria e propriedades de deformacionais do aterro nas diferentes análises

Na Figura 6 são apresentados os resultados numéricos relativos às pressões verticais sobre a travessa superior e às pressões horizontais no montante, respectivamente. Estes resultados referem-se ao fim da construção. Devido à variação observada nas pressões medidas, mesmo alguns dias após o fim da construção do aterro, os valores medidos em cada uma das células de pressão são representados por dois círculos a cheio. No que diz respeito às análises A1 a A3, é visível na Figura 6a que o modelo sobrestima ligeiramente as pressões a meio vão da travessa. Na Figura 6b são visíveis grandes discrepâncias entre as pressões sobre o montante medidas e calculadas.

Considerando agora para os resultados obtidos da análise A4, na qual se considerou a existência de uma zona do aterro lateral com deficiente compactação, é possível observar uma muito melhor concordância em todos os parâmetros analisados. As pressões verticais sobre a travessa ajustam-se melhor às medidas e as pressões horizontais no montante estão também muito mais próximas da medida pela célula PC4. Na realidade, a adopção de uma zona do aterro lateral mais flexível é consistente com o que foi observado durante a construção, na medida em que devido a constrangimentos relativos à utilização dos equipamentos de compactação junto aos montantes o aterro nesta zona não é compactado com a mesma eficácia, ou não é mesmo compactado de todo.

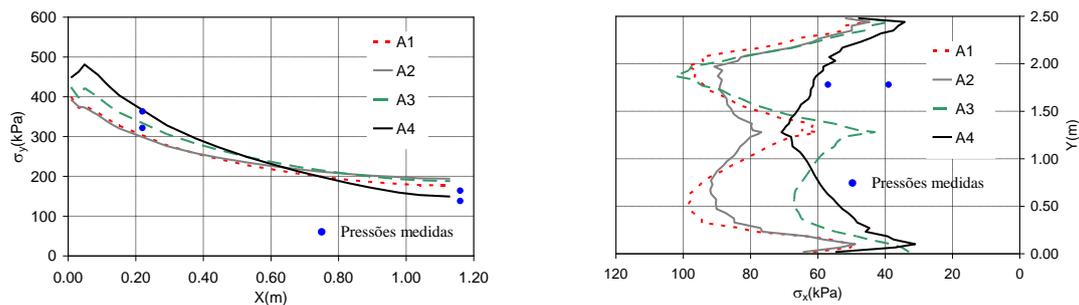


Figura 6 - Pressões de terras no final da construção: a) travessa; b) montante.

## 4. ANÁLISE DOS MECANISMOS DE MIGRAÇÃO DE TENSÕES

### 4.1. Interpretação teórica

Tendo em conta os resultados experimentais e numéricos anteriormente apresentados é possível constatar que a distribuição de pressões que actuam na BC é substancialmente distinta da distribuição geostática.

Relativamente à travessa superior, a distribuição de pressões verticais é condicionada pela diferença de rigidez entre a BC e o material de aterro, originando a migração de tensões das zonas mais deformáveis para as zonas mais rígidas à medida que o aterro é construído. De modo a auxiliar a explanação considere-se o modelo simplificado de blocos apresentado na Figura 7. A maior deformabilidade dos blocos laterais relativamente à BC origina a mobilização de tensões tangenciais entre o solo/betão e entre solo/solo, levando a que estes blocos se “pendurem” nos blocos adjacentes. Desse modo, a pressão de terras exercida pelo bloco central sobre a BC passa a ser superior ao seu peso próprio. Este facto encontra-se evidenciado na análise A4, na medida em que a diminuição da rigidez do aterro lateral potencia os mecanismos acima referidos. Por sua vez, os mecanismos em questão não se mostram muito afectados pela variação do módulo de deformabilidade de todo o solo envolvente (ver resultados A1 e A2).

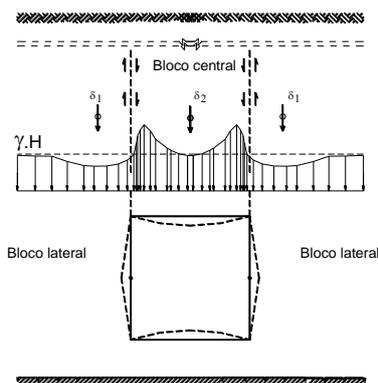


Figura 7 - Mecanismo de migração de pressões em torno de uma BC.

No que se refere às pressões horizontais sobre o montante, verifica-se que a sua distribuição é algo complexa. Vários factores contribuem para esta ocorrência, sendo de notar que a forma do diagrama de pressões é em boa parte condicionada pela deformada do montante. Pressões mais elevadas ocorrem nas zonas onde o montante se deforma contra o solo e vice-versa. Por outro lado, o facto das tensões verticais do aterro lateral na proximidade da BC serem inferiores  $\gamma \square .H$  contribui para que as pressões horizontais se afastem ainda mais da distribuição  $K_0$  (determinada em condições geostáticas).

## 4.2. Comparação com as recomendações da AASTHO

Tal como anteriormente referido, a AASTHO (2002) recomenda para o dimensionamento de BC's a aplicação de factores majorativos à carga total aplicada na travessa superior da estrutura. No entanto nada é referido relativamente à forma de distribuição de pressões na travessa. De acordo com estudos previamente efectuados pelos autores (Pimentel et al. 2008) a evolução da forma do diagrama de pressões no decorrer do processo de construção do aterro não é linear, sendo condicionada pelo processo construtivo e pela não linearidade material da própria BC. Deste modo e de forma a atender à evolução dos esforços na BC definiu-se um factor de interacção de momentos flectores a meio vão da travessa superior, sendo dado por:

$$F_M = \frac{\Delta M}{\Delta M_{\gamma H}} \quad (2)$$

O factor de interacção de momento flector na travessa superior é definido como o rácio entre o integral do diagrama de esforço transversal calculado com o modelo desde a secção de meio vão até à secção de ligação estrutural com o montante ( $\Delta M$ ) e o mesmo integral calculado com uma distribuição de pressões igual a  $\gamma.H$ , i.e., sem considerar a interacção solo/estrutura ( $\Delta M_{\gamma H}$ ).

Na Figura 8 apresenta-se a evolução dos factores de interacção de carga total  $F_e$  e de momento flector  $F_M$ , para as diferentes análises efectuadas, sendo que agora as análises foram prolongadas até ser atingida a rotura estrutural da BC.

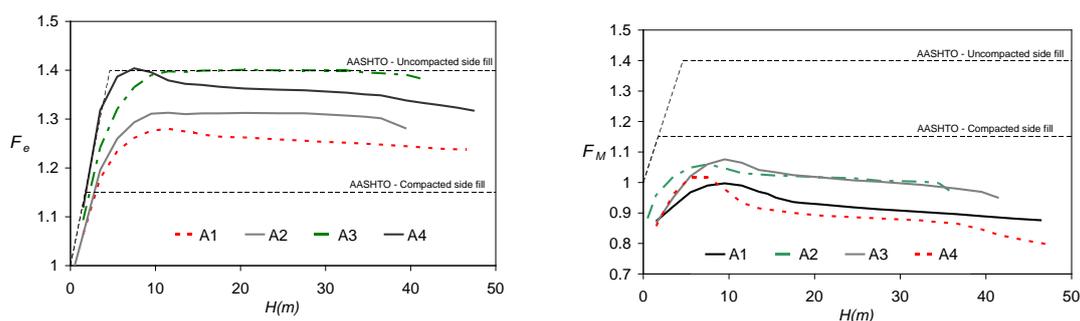


Figura 8 - Evolução dos factores de interacção com a altura de aterro: a)  $F_e$ ; b)  $F_M$

A análise da Figura 8 permite retirar as seguintes ilações: i) ambos os factores de interacção apresentam um valor máximo, a partir do qual se assiste a um decréscimo resultante do desenvolvimento de fissuração na travessa; ii) o factor  $F_e$  apresenta-se sempre superior a 1,0, ou seja, a carga total aplicada à BC é sempre superior ao peso do prisma de terras sobrejacente à travessa; iii) o factor  $F_M$  embora possa atingir valores superiores a 1,0 para alturas de aterro moderadas, tende a diminuir para valores inferiores à unidade com o aumento da altura de aterro, ou seja, verificando-se esforços de flexão a meio vão inferiores aos determinados por uma distribuição uniforme de pressões de terra; iv) comparando os resultados apresentados com as recomendações da AASTHO, verifica-se uma boa proximidade para o factor  $F_e$ , mas uma má concordância relativa ao factor  $F_M$ , pois a AASTHO não tem em conta a forma do diagrama de pressões; v) a existência de uma fundação rígida (análise A3) ou de um aterro lateral mal compactado (análise A4) conduzem a um factor de interacção ( $F_e$ ) mais elevado.

## 5. CONCLUSÕES

A análise do caso de estudo apresentado permitiu validar o modelo de cálculo utilizado. O modelo conseguiu reproduzir de uma forma satisfatória a realidade observada em obra. Para

além disso, o estudo apresentado permitiu a interpretação dos fenómenos de migração de tensões inerentes a este tipo de obras. Após validado o modelo numérico procedeu-se a uma extrapolação para diferentes alturas de aterro e os resultados obtidos foram comparados com as recomendações de projecto propostas pela AASTHO. Do estudo apresentado podem-se retirar as seguintes conclusões:

i) os resultados experimentais e as modelações numéricas efectuadas vêm uma vez mais confirmar que a resultante das pressões actuantes na travessa superior é superior ao peso do solo de aterro sobre a travessa, podendo ser atingidas diferenças da ordem dos 30%. O diagrama de pressões não é uniforme, apresentando pressões inferiores a meio vão e superiores junto aos montantes.

ii) os mecanismos de interacção são fortemente influenciados pela diferença de deformabilidade entre o solo adjacente ao montante da BC e o restante solo circundante;

iii) A forma do diagrama de pressões na travessa superior é claramente afectada pela não linearidade da BC, tendendo de uma forma parabólica para trapezoidal à medida que a rigidez da travessa diminui devido à fissuração da mesma;

iv) Os factores de interacção apresentados pela AASTHO embora traduzam relativamente bem a força total aplicada à BC, não permitem uma estimativa correcta dos esforços internos da BC, nomeadamente os momentos flectores a meio vão da travessa superior.

## REFERÊNCIAS

- AASHTO (2002). "AASHTO Standard Specifications for Highway Bridges." *American Association of State Highway and Transportation Officials*, Washington D.C., USA.
- Bennett, R., Wood, S., Drumm, E., e Rainwater, N. (2005). "Vertical Loads on Concrete Box Culverts under High Embankments." *Journal of Bridge Engineering*, 10(6), p643-649.
- Dasgupta, A., e Sengupta, B. (1991). "Large Scale Model Test on Square Box Culvert Backfilled with Sand." *Journal of Geotechnical Engineering*, 117(1), p156-161.
- Figueiras, J. A., Félix, C. e Cardoso, A. S. (2001). "Análise do Comportamento de Estruturas de Betão Enterradas (Box-Culverts)" em *IBRACON - 44º Congresso Brasileiro*.
- Kim, K. e Yoo, C. (2005). "Design Loading on Deeply Buried Box Culverts." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(1), p20-27.
- Marston, A. (1930). "The theory of external loads on closed conduits in the light of the latest experiments." *Bulletin 96, Iowa Engineering Experiment Station*, Ames, Iowa.
- Marston, A., e Anderson, A. O. (1913). "The theory of loads on pipes in ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer pipes." *Bulletin 31, Iowa Engineering Experiment Station*, Ames, Iowa.
- Pimentel, M., Costa, P., Félix, C. e Figueiras, J.A. (2006). "Modelação De Passagens Enterradas Constituídas Por "Box-Culverts" Sob Aterros de Altura Elevada." *IV Jornadas Portuguesas de Engenharia de Estruturas JPEE 2006* (CD-ROM), Lisboa.
- Pimentel, M., Costa, P., Félix, C., Figueiras, J. A. (2008) "Comportamento Estrutural de "Box-Culverts" Sob Alturas de Aterro Elevadas." *2º Congresso Nacional da Pré-Fabricação em Betão*, Lisboa.
- Pimentel, M. (2004). "Modelação e Análise de Estruturas Laminares de Betão: Possibilidades e Desafios." Dissertação de Mestrado, *FEUP*.
- Sprangler, M. G. (1950) "Field measurements of the settlement ratios of various highway culverts." *Bulletin 170, Iowa Engineering Experiment Station*, Ames, Iowa.
- Tadros, M., Benak, J., e Gililand, M. (1989) "Soil Pressure on Box Culverts." *ACI Structural Journal*, 86(4), p439-450.