

NOVOS DESENVOLVIMENTOS SOBRE O MÉTODO EXTENSOMÉTRICO PARA MONITORIZAR CONVERGÊNCIAS EM TÚNEIS

NEW DEVELOPMENTS ON THE EXTENSOMETRIC METHOD FOR MONITORING CONVERGENCES IN TUNNELS

Dinis da Gama, Carlos, *Centro de Geotecnia, IST, Lisboa, Portugal, dgama@ist.utl.pt*

RESUMO

Com base na configuração original de extensómetros eléctricos de resistência instalados sobre cambotas de suporte de túneis, a qual foi objecto de patente nacional, foram subsequentemente ampliadas as potencialidades do método extensométrico, através da incorporação de novos desenvolvimentos, que se descrevem no presente artigo.

Descrevem-se aplicações do método à monitorização contínua da segurança de túneis em construção e em serviço, desde modelos físicos à escala laboratorial a duas e três dimensões, até túneis reais, sempre com a validação dos valores calculados das convergências a partir de registos efectuados por meio de processos alternativos.

ABSTRACT

Based on the original layout of electrical resistance strain gages installed on steel arches for the support of tunnels, which was patented, their application have been extended through the introduction of new developments, that are described in this article.

Application examples for continuously monitoring of tunnel safety are described, for both tunnels under construction and in service, as well as physical models in two and three dimensions, always validating computed convergences against measured convergences obtained by means of alternative methods.

1 - INTRODUÇÃO

O Método Extensométrico para Monitorizar CONvergências em Túneis (abreviadamente MEMCOT) foi proposto para facilitar a avaliação contínua da estabilidade de túneis em fase de construção, ou de serviço. Ao contrário dos métodos convencionais utilizados para medir convergências entre pontos prédefinidos do contorno da secção dos túneis, o MEMCOT não se restringe a medições pontuais, feitas periodicamente, nem interrompe a realização dos trabalhos de construção, ou de exploração dos referidos túneis.

Outra vantagem do novo processo consiste na consulta interactiva dos dados de convergência instantâneos ou acumulados, assim como das velocidades de convergência calculadas entre quaisquer intervalos de tempo escolhidos pelo utilizador, e ao longo de direcções ortogonais ou inclinadas em que se determinem as convergências.

Sendo uma metodologia que possui características evolutivas, tem sido possível aperfeiçoar a sua concepção inicial, através de novas aplicações, que se descrevem nos parágrafos seguintes.

Destaca-se, em particular, a abordagem teórica do problema das deformações e deslocamentos associados a barras curvas, que possibilita a determinação de convergências por meio de um algoritmo alternativo do anteriormente desenvolvido.

2 - EXPANSÃO DAS APLICAÇÕES DO MEMCOT

A teoria da flexão de barras curvas permite abordar quantitativamente o problemas das correlações entre as deformações medidas nos extensómetros e os deslocamentos que sofrem os pontos da periferia do túnel.

Com efeito, considerando uma viga curva formada por uma barra como um arco de circunferência inicial de raio R_1 , submetida a uma força que lhe provoca uma deformação axial igual a ε_x , sobre uma secção localizada à distância y do eixo neutro da viga, demonstra-se (Benham & Warnock, 1973) que essa deformação é dada por:

$$\varepsilon_x = \frac{y(R_1 - R_2)}{R_2(R_1 + y)}$$

onde R_2 representa o novo raio de curvatura da barra após a deformação.

Daqui se infere que o deslocamento radial sofrido pela referida secção é:

$$\delta_r = R_1 - R_2 = \frac{\varepsilon_x R_1 (y + R_1)}{\varepsilon_x R_1 + y(1 + \varepsilon_x)}$$

A validação desta expressão perante resultados experimentais foi efectuada através de vários tipos de investigações, a seguir descritas.

2.1 - Ensaios sobre modelos à escala laboratorial

Diversos ensaios de aplicação de cargas sobre lâminas de aço (Figura 1), ou sobre perfis que simulam as cambotas metálicas de suporte dos túneis (Figura 2), foram realizados de modo a correlacionar convergências medidas no laboratório e convergências calculadas pela fórmula acima apresentada.

Para além de se verificar uma elevada correlação linear entre as deformações lidas nos extensómetros e os deslocamentos dos pontos onde cada extensómetro fora instalado, estes deslocamentos eram utilizados para determinar as convergências entre pontos opostos do contorno do modelo.

Subsequentemente, procuram comparar-se as convergências assim medidas com as calculadas por meio do algoritmo indicado. O acordo de valores é notável e os desvios verificados são de pequena amplitude, como mostra a Tabela 1.

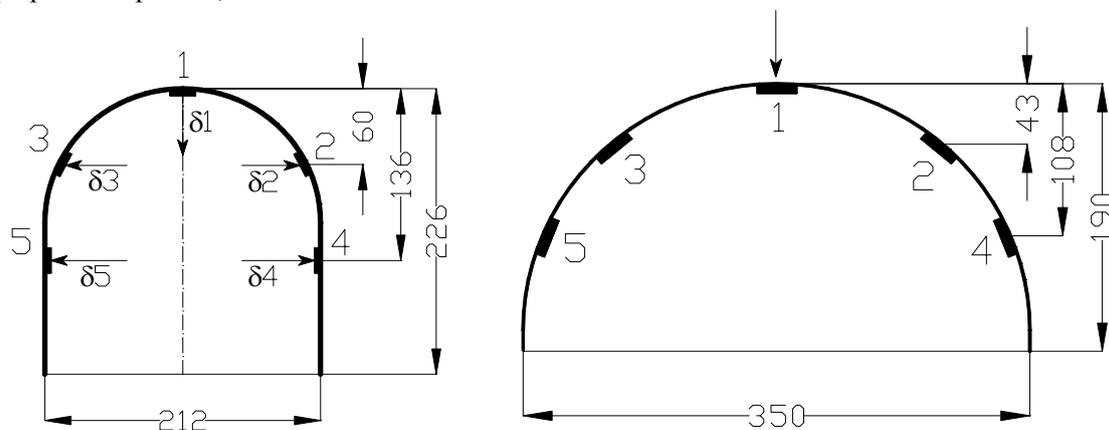


Figura 1 – Geometria de lâminas de aço usadas para simular comportamentos de cambotas

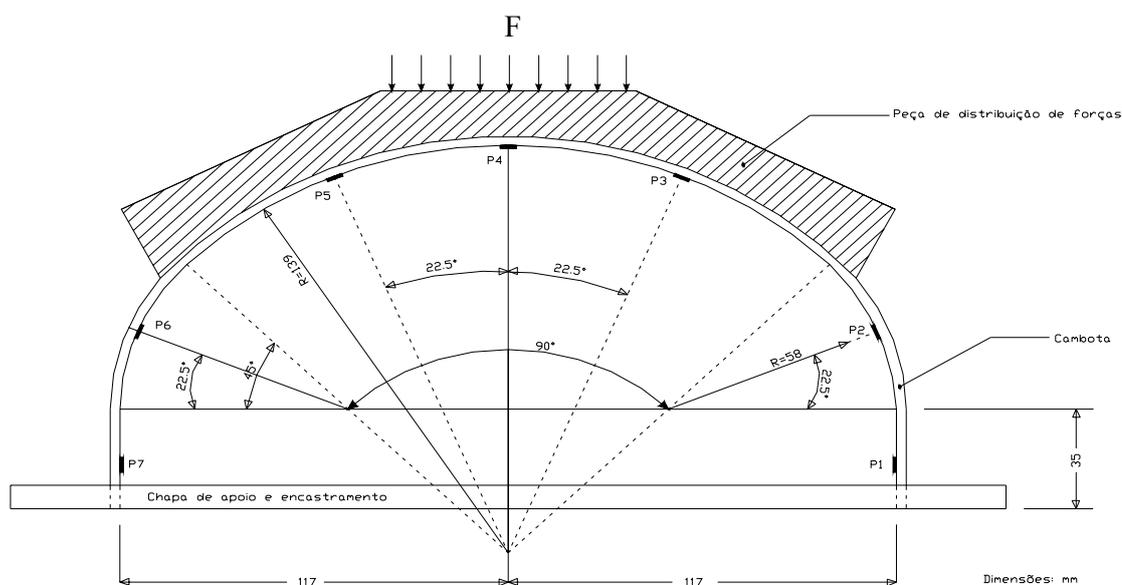


Figura 2 – Geometria do modelo de cambota formada por perfil metálico onde se aplicavam cargas verticais e horizontais independentes

Tabela 1 –Valores numéricos de convergências medidas vs. calculadas em modelo de cambota

Zona do modelo	Força máxima do ensaio (N)	Valores máximos medidos nos ensaios		Deslocamentos calculados (10^{-3} mm)
		Deformações (10^{-6})	Deslocamentos (10^{-3} mm)	
Coroa (P4)	450	-52	158	134
	600	-60	214	201
	750	-78	249	233
	900	-85	297	271
Corda horizontal superior (P3 – P5)	450	-150	182	166
	600	-190	215	202
	750	-219	237	218
	900	-237	291	270
Corda horizontal intermédia (P2 – P6)	450	569	-227	-244
	600	733	-304	-332
	750	873	-346	-365
	900	1043	-402	-434

Outra potencialidade do método, raramente encontrada nos processos convencionais, foi a representação gráfica das deformadas de cada cambota, por forma a detectar se determinada convergência resulta da aproximação dos dois pontos opostos, ou apenas do deslocamento de um deles, ou até da soma de uma convergência negativa (divergência) com outra positiva.

Tal feição permite investigar comportamentos anómalos com maior eficácia, detectando deslocamentos inesperados e, ainda, possibilitando a implementação de um critério de estabilidade da secções do túnel que não seja apenas o da velocidade de convergência admissível (habitualmente é considerado como valor de perigo 1 mm/dia), mas sim através de aferição por modelos numéricos, face aos deslocamentos admissíveis em cada ponto da periferia do túnel. A Figura 3 ilustra essa feição do programa de cálculo desenvolvido para o cálculo de convergências.

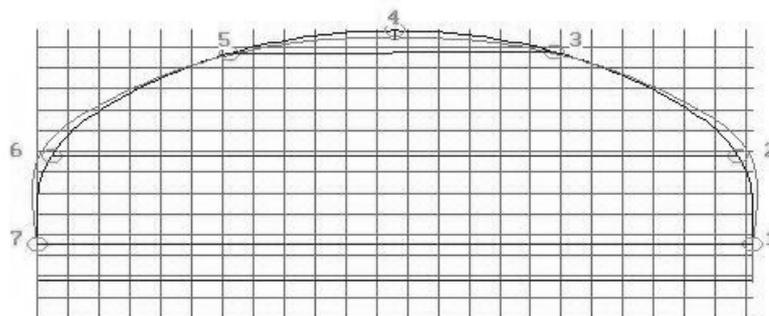


Figura 3 - Exemplo de deformada de modelo de túnel rodoviário após registo de deformações em 7 pontos da sua periferia

2.2 - Ensaio à escala real

A primeira aplicação do MEMCOT a túneis reais ocorreu em 2003, durante a execução do Túnel Término da Falagueira, na Linha Azul do Metro de Lisboa. A escavação processava-se a bom ritmo, assim como a instalação de cambotas metálicas de aço com perfil THN-29.

Em diversas cambotas metálicas foram instalados extensómetros eléctricos de resistência, que forneceram deformações (medidas periodicamente) sobre sete pontos localizados ao longo do banzo interior das cambotas. Para efeitos comparativos, consideram-se as medições de convergências realizadas por métodos de topografia de precisão (Gama, 2004).

Os principais resultados obtidos expressaram-se através de gráficos com a evolução das deformadas das várias secções instrumentadas por meio de extensómetros eléctricos, tal como mostra a Figura 4.

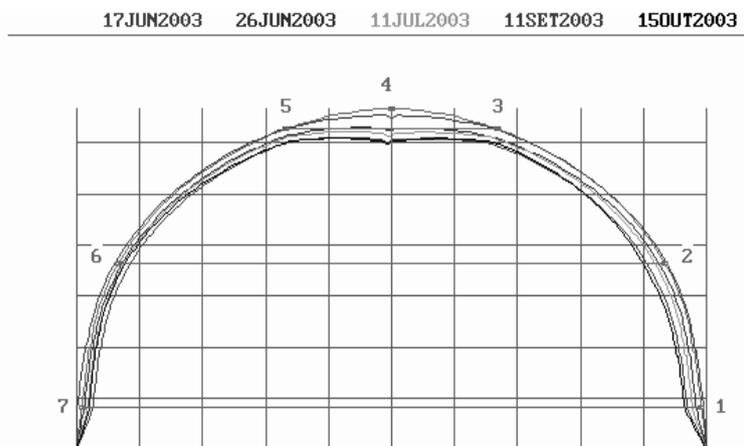


Figura 4 - Evolução das convergências na cambota do Pk 25+895.50 do Túnel da Falagueira

Em termos de validação com dados referentes à teoria das vigas curvas, os resultados alcançados podem ser verificados a partir da concepção do arco de pressões que rodeia os túneis, significando o volume de terreno que por acção da gravidade descarrega o seu peso próprio sobre o sistema de suporte do túnel.

Tal abordagem pressupõe que o conjunto terreno-suporte está solidário na deformação e, assim, a distância à fibra neutra (variável designada por y na expressão acima apresentada) depende da espessura do arco de pressão sobre o tecto, como mostra a figura seguinte, que traduz o modelo inicialmente desenvolvido por Terzaghi e mais tarde modificado por outros autores (ver Figura 5).

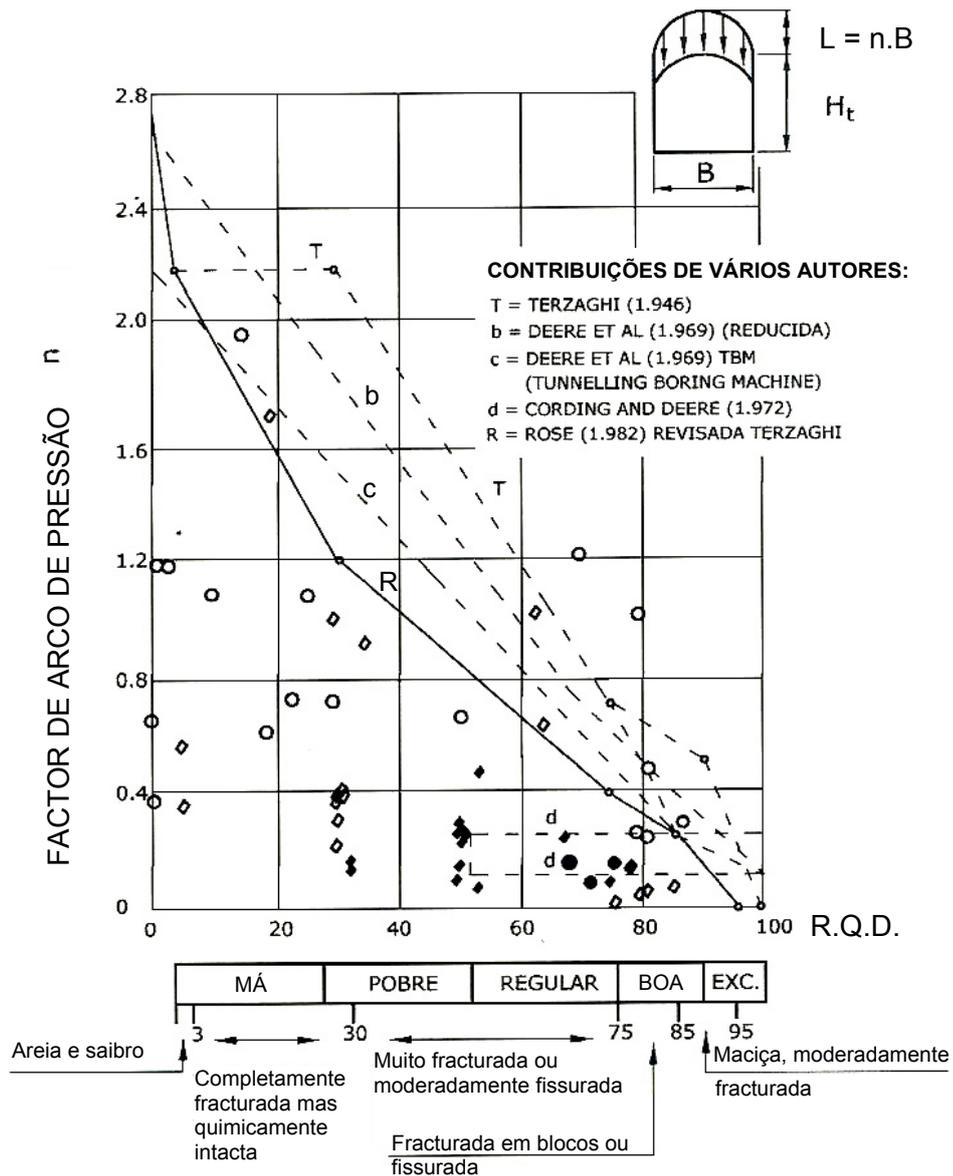


Figura 5 - Variação do tamanho do arco de pressão em torno dos túneis com o RQD do maciço, segundo o critério de Terzaghi, modificado por Rose (1982) e segundo Ucar (2004)

Face aos valores numéricos da Figura5, a curva principal respeita a equação:

$$n = -5 \times 10^{-6} R^3 + 0,0009 R^2 - 0,0725 R + 2,69$$

onde R representa o RQD e o coeficiente de correlação é igual a 0,9926.

Assinale-se que quando são instaladas pregagens no tecto e hasteais do túnel, prevalece esta instalação, devendo-se atribuir a y um valor equivalente ao comprimento útil das pregagens.

A aplicação desta metodologia ao caso do Túnel da Falagueira foi desenvolvida para duas situações, a seguir descritas.

A - Deslocamentos verticais no centro do tecto da cambotas

Foi medido por métodos topográficos de precisão, na cambota situada ao Pk 25+957,33, um deslocamento máximo de 4,30 mm no centro do tecto do túnel. Nessa cambota, a deformação registada no extensómetro localizado nesse mesmo ponto do tecto foi de 619×10^{-6} .

Sabendo que o raio de curvatura superior do túnel era de 4,95 m e a largura da base da secção 10,24 m, e considerando esta última da mesma ordem de grandeza de y (altura do arco de pressões), resulta um deslocamento radial calculado de 4,54 mm.

B - Convergência horizontal

Para fins de comparação, os dados de medição na referida cambota levaram a uma convergência na corda horizontal com o valor máximo de 3,40 mm, enquanto que o cálculo pela expressão acima apresentada, a partir de deformações nos dois pontos opostos do contorno do túnel, forneceu uma convergência de 3,88 mm. Estes resultados permitem validar a presente abordagem no caso de um túnel real.

2.3 - Modelo tridimensional em laboratório

Com o objectivo de permitir estudar o comportamento do revestimento tubular de um túnel submetido a diversos estados de tensão e monitorizando as respectivas deformações através de quatro secções distintas (cada uma das quais possuindo 5 extensómetros eléctricos), colocadas a distâncias crescentes da frente de escavação, realizou-se uma campanha de ensaios em que se registavam, simultaneamente, as deformações nos extensómetros e os deslocamentos relativos das paredes interiores do tubo. O arranjo experimental é mostrado na Figura 6, quando era aplicada a carga pela prensa sobre um segmento de comprimento fixo.

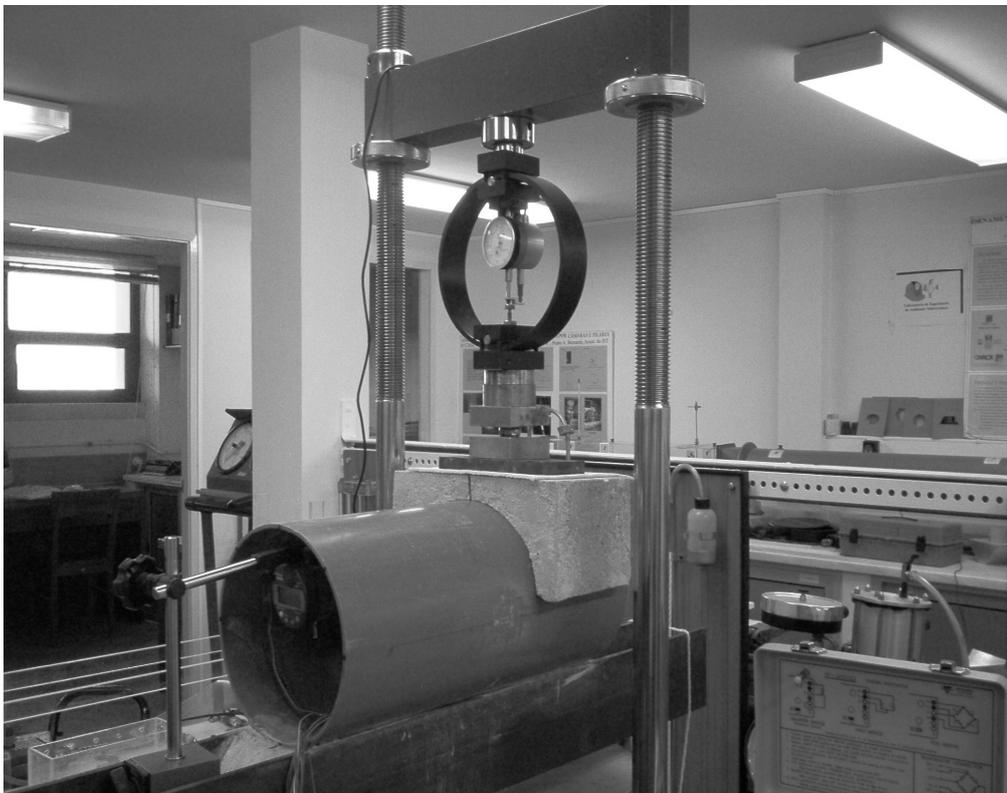


Figura 6 – Vista do ensaio de carga em modelo 3-D de túnel

Em termos de validação, a Figura 7 revela, por intermédio de um gráfico, a comparação entre valores das convergências medidas no laboratório com LVDT's e as convergências calculadas pelo método MEMCOT. Observa-se que há um desvio sistemático entre os valores medidos e calculados da convergência, desvio esse com um máximo de 18%, sendo positivo para as convergências horizontais e negativo para as verticais.

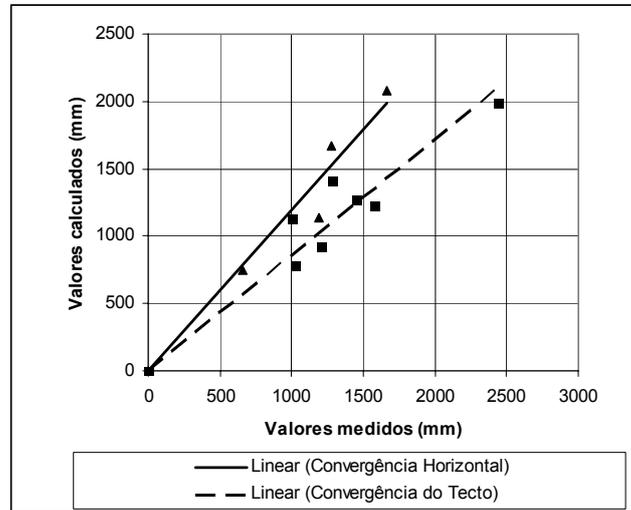


Figura 7 – Gráfico comparativo de convergências medidas e calculadas no tubo de PVC

3 – OUTRAS APLICAÇÕES

3.1 – Túnel em Singapura

O projecto de um túnel de serviço metroviário em Singapura, com secção circular de raio interior igual a 2,86 m e raio exterior 3,12 m (ver Figura 8) exigia a implantação de monitorização contínua durante a execução. Para o efeito, foi solicitada a aplicação do MEMCOT, através da simulação de diversas situações de obra e de exploração, incluindo casos extremos, como o representado na Figura 9, onde se consideraram alternâncias de tracções e compressões lidas nos extensómetros de monitorização do contorno da secção.

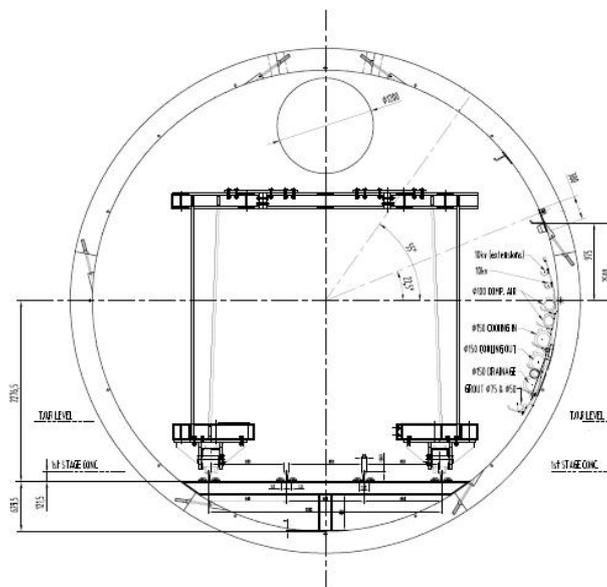


Figura 8 - Secção do túnel de Serviço da Circle Line 4 & 5 (Singapura)

Para além das vantagens oferecidas pelo método em termos de não interrupção do processo construtivo, houve possibilidade de analisar a sua versatilidade na interpretação de deformações que possam verificar-se na construção, bem como na sua exploração. O exemplo da Figura 8 revela uma dessas soluções.

IST-Geotechnical Center
Extensometer Convergence Method - Each square is 1mX1m
DEFORMED PERIPHERY IN 25-05-2005

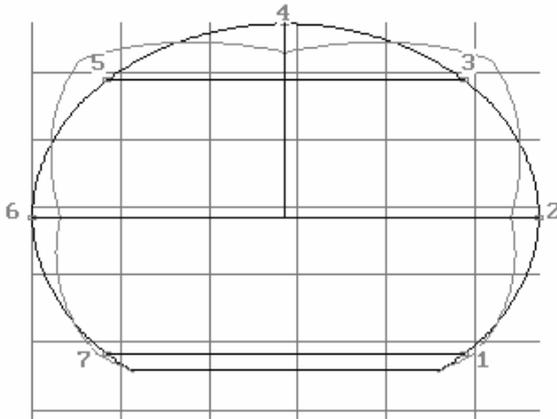


Figura 9 - Resultado da simulação de comportamento de cambota sujeita a várias inflexões (deformações em escala exagerada relativamente à secção do túnel)

3.2 – Túneis com assentamentos na base das cambotas

Uma outra aplicação, orientada para a construção de túneis em maciços de fraca resistência, onde são possíveis assentamentos das bases das cambotas, foi também desenvolvida, quer a partir de testes laboratoriais (Figura 10) , quer por aplicação do algoritmo acima apresentado (Figura11).



Figura 10 - Modelo laboratorial de cambota com apoio de base deformável

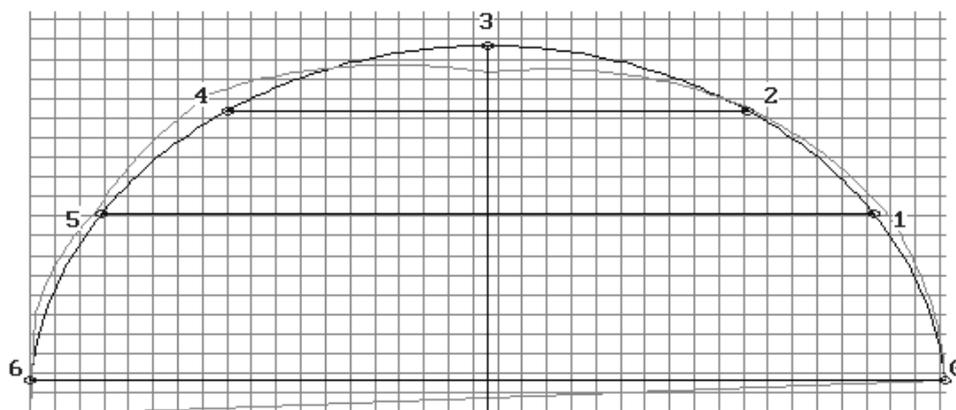


Figura 11 - Representação da geometria do modelo de cambota e da sua deformada após carga

Constatou-se que existia também uma apreciável concordância entre resultados experimentais e do programa de cálculo, este último permitindo equacionar variadas combinações entre assentamentos e deformações no arco.

Note-se que este tipo de situação exige o fornecimento, para além das deformações registadas nos extensómetros, de dados relativos aos sucessivos assentamentos verificados no pé das cambotas, a monitorizar por sistemas apropriados (electro-níveis, por exemplo).

4 - CONCLUSÕES

A importância crescente da monitorização permanente das obras geotécnicas em geral e dos túneis em particular, justificada pelo primado da sua segurança e pelas garantias de protecção ambiental, justifica aturados esforços de investigação (Tsesarsky & Hatzor, 2006).

Nessa conformidade, a expansão de aplicações do MEMCOT tem permitido ampliar as suas potencialidades, através de melhorias do algoritmo matemático, para além de outros aperfeiçoamentos de natureza operacional, tais como:

- Instalação de quatro extensómetros eléctricos, em vez de um apenas, sobre cada ponto de monitorização de convergências;
- Utilização, no lugar dos extensómetros eléctricos, de sensores de fibra óptica do tipo “Bragg gratings”;
- Para túneis já em serviço, montagens de sensores sobre barras metálicas ou perfis de poliéster, sem interferência com os revestimentos já existentes.

Em suma, as novas aplicações do MEMCOT têm sido desenvolvidas no sentido de expandir as suas potencialidades, proporcionando:

- a) Maior versatilidade.
- b) Maior disponibilidade.
- c) Menos interferências com os trabalhos em andamento.

- d) Possibilidade de fornecer dados de alarme.
- e) Viabilidade de transmissão de dados “on line” para redes de computadores localizados a qualquer distância da obra.
- f) Procura de baixos custos de monitorização.

5 - REFERÊNCIAS

Benham, P. & Warnock, F., 1973 - Mechanics of Solids and Structures, Pitman, London

Gama, C. D., 1996 - Correlation between Rock Mass Classes, Convergence Rates and Support Densities for Underground Coal Mine Excavations. EUROCK1996, Torino, Editor G. Barla, pp.825-830.

Gama, C. D., 2004 - A Method for Continuous Monitoring of Tunnel Deformations during Construction and Service Phases. Proceedings of EUROCK2004, Salzburg, Editor W. Schubert, pp.251-254.

Jimeno, C. L., 1997 - Manual of Tunnels and Underground Workings (in Spanish). Entorno Gráfico, Madrid.

Terzaghi, K., 1946 - Rock Tunnel with Steel Supports. Editado por R.V. Proctor and T. White. Commercial Shearing co., Youngstown, Ohio, pp.15-99.

Tsesarsky, M. and Hatzor, Y.H., 2006 - Tunnel Roof Deflection in Blocky Rock Masses as a Function of Joint Spacing and Friction - A Parametric Study using Discontinuous Deformation Analysis (DDA). Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 21, January 2006, pp. 29-45.

Ucar, Roberto 2004 - Manual de Anclajes en Ingeniería Civil. Gráficas Arias Montano, Madrid.