

Art_5.11

MODELAÇÃO NUMÉRICA DA CONSTRUÇÃO DE UM TÚNEL SUPERFICIAL

Francisco Ferreira Martins
Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho
Guimarães, Portugal
ffm@civil.uminho.pt

RESUMO

Neste trabalho é apresentada a modelação numérica da construção de um túnel superficial. Esse túnel foi construído na cidade do Porto e foi escavado num maciço de solo residual do granito com um processo construtivo baseado nos princípios do NATM. Foi atribuído aos solos um comportamento elástico linear perfeitamente plástico, definido até à rotura por um módulo de deformabilidade independente dos níveis de tensão ou de deformação. A rotura dos solos foi controlada pelo critério de Mohr-Coulomb. São apresentados os deslocamentos medidos através de instrumentação colocada numa das secções principais de observação. Esses valores são comparados com os valores obtidos nos cálculos efectuados. Observa-se uma concordância razoável entre os valores medidos e calculados.

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho vem na sequência de outros anteriormente apresentados relacionados com a modelação numérica da construção de um túnel superficial construído na cidade do Porto (Ferreira da Costa, 2001, Martins et al., 2003, Martins et al., 2004).

O túnel analisado tem 134m de comprimento e uma secção recta de cerca de 95 m². O seu recobrimento varia entre 5 e 13 m. A escavação foi efectuada com base nos princípios do NATM e foi executada em duas fases (Fig.1). Na primeira fase foi completamente escavada a abóbada que corresponde a cerca de 70 % da secção recta final. Os restantes 30% formam escavados durante a segunda fase. Neste trabalho é apenas analisada a primeira fase da construção do túnel.

Com o objectivo de controlar o comportamento do túnel, foram instrumentadas várias secções normais ao eixo do túnel. Neste trabalho é analisada uma das secções principais de instrumentação.

2. CONDIÇÕES DO TERRENO

O perfil geotécnico ao longo do eixo do túnel é composto por três estratos: uma camada de aterro no topo, um estrato intermédia de um granito muito ou completamente alterado do tipo W5 e um estrato rígido no fundo (granito W3). O estrato intermédio inclui, nalgumas partes, blocos de granito de diferentes dimensões classificados como W1-2 e W3. A espessura destes estratos varia ao longo do eixo do túnel.

Na secção analisada (Fig. 1) a camada do topo tem 2,25 m de espessura e o estrato rígido está localizado a cerca de 22 m de profundidade.

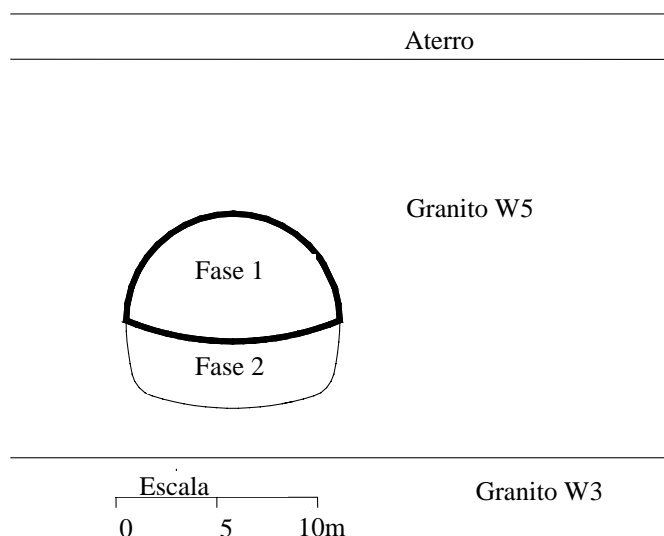


Figura 1 – Secção analisada com as duas fases de escavação e o perfil geotécnico

3. PROCESSO CONSTRUTIVO

Foi usado um processo construtivo baseado nos princípios do Novo Método Austríaco de Construção de Túneis (NATM) (Fig. 2). A escavação da abóbada foi efectuada por fases, a saber: escavação da parte superior, instalação do suporte primário nessa parte, escavação da parte inferior, instalação do suporte primário nessa parte e execução de uma soleira temporária. A parte superior da abóbada avançava num máximo de quatro lances, tendo cada um entre 0,8 m e 1m de comprimento.

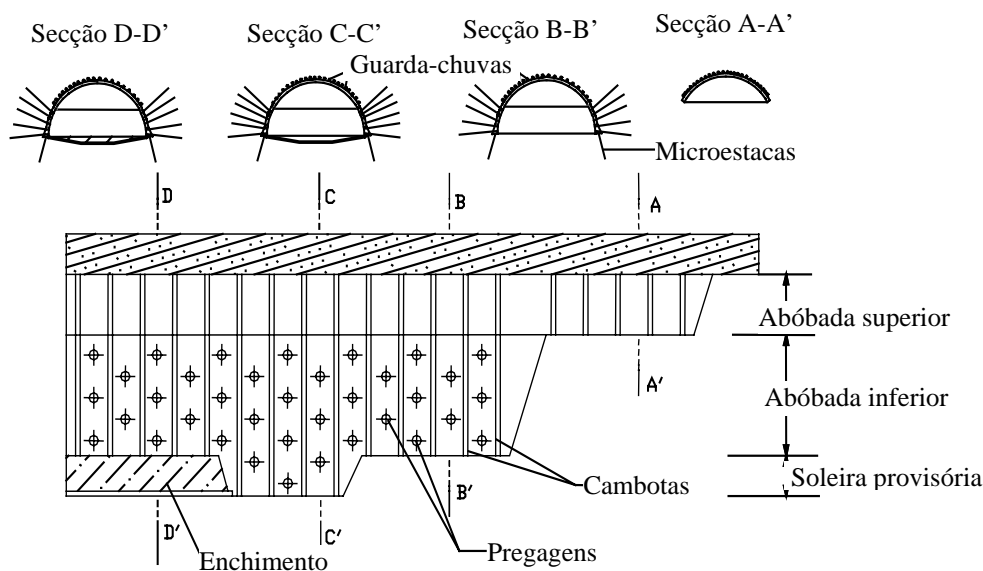


Figura 2 – Método construtivo (representação esquemática)

A bancada e a soleira definitiva foram executadas após a escavação completa da abóbada do túnel.

Para proteger o avanço da abóbada foram usados guarda-chuvas ou enfilagens. O suporte primário consistiu em betão projectado reforçado com duas camadas de malha electrosoldada

e cambotas metálicas. Foram instalados na parte inferior da abóbada pregagens e foram usadas microestacas sob secções alargadas do suporte da parte inferior da abóbada. A espessura do suporte primário tinha inicialmente 0,15 m e era posteriormente aumentada para 0,25 m.

Na frente da escavação era projectado betão perfazendo uma espessura de 0,05 m.

4. INSTRUMENTAÇÃO

A instrumentação foi instalada quer para controlar os movimentos nos edifícios vizinhos quer para controlar o próprio processo construtivo. Ela foi materializada através de marcas topográficas superficiais, varões extensométricos com três pontos de ancoragem, inclinómetros e bases para medição de convergências no interior do túnel.

As marcas topográficas superficiais permitiram medir os deslocamentos verticais através de equipamento topográfico, os varões extensométricos permitiram medir os deslocamentos relativos entre pontos situados à superfície do terreno e os pontos de ancoragem dos varões e os inclinómetros permitiram medir os deslocamentos horizontais do terreno.

Na Fig. 3 é apresentada a instrumentação usada na secção analisada.

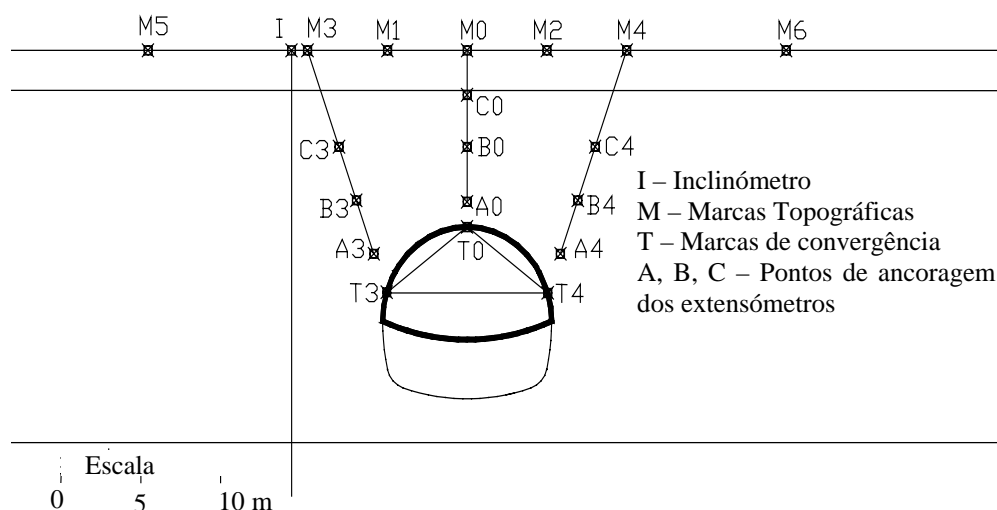


Figura 3 – Localização dos dispositivos de observação

5. ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS

5.1. Programa de computador e malha adoptada

A presente análise foi efectuada usando um programa de computador especialmente concebido para problemas geotécnicos. Este programa foi inicialmente desenvolvido por Cardoso (1987) e foi mais tarde significativamente melhorado por Almeida e Sousa (1998). Permite a utilização de diferentes tipos de elementos, de diferentes propriedades materiais e de vários critérios de cedência, e a remoção e/ou substituição de elementos. É também apropriado para a simulação numérica da construção de túneis.

Na Fig. 4 é apresentada a malha tridimensional usada na análise por elementos finitos. É composta por 5820 nós e 6438 elementos isoparamétricos de 8 nós. Devido à simetria só foi considerada metade da geometria. Nas fronteiras laterais são impedidos os deslocamentos

horizontais na direcção perpendicular às mesmas, e na fronteira inferior são impedidos quer os deslocamentos horizontais quer os deslocamentos verticais.

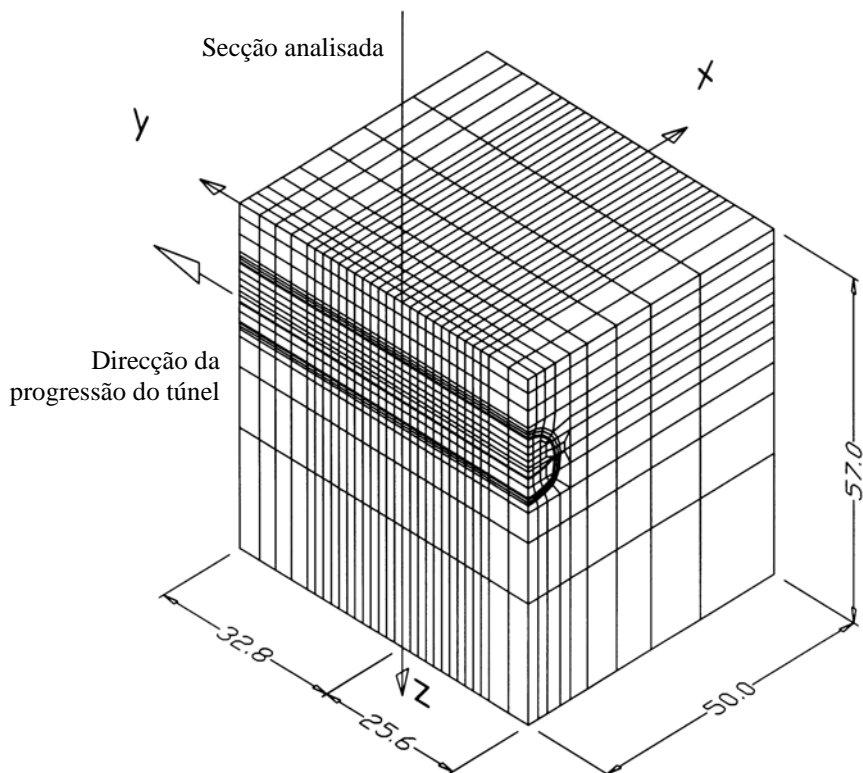


Figura 4 – Malha tridimensional adoptada

5.2. Parâmetros usados

Os parâmetros usados na análise por elementos finitos foram baseados não só em ensaios ‘in situ’ e em laboratório mas também em vários trabalhos existentes na bibliografia relacionados com o mesmo tipo de solo (Viana da Fonseca et al.(1994), Viana da Fonseca (1996), Topa Gomes (1998)).

Os parâmetros usados na definição do estado de tensão inicial e as características mecânicas adoptadas são apresentados no Quadro 1 e a forma como os mesmos foram obtidos pode ser encontrada em Martins e tal. (2003).

Quadro 1 – Parâmetros adoptados na modelação numérica

Solos	γ (kN/m ³)	K_0	E' (MPa)	ν'	c' (kPa)	ϕ' (°)
Aterro	19	0,4	20	0.35	0	30
Solo residual (W5)	19	0,4	$33+5.3 \cdot z$	0.35	10	38
Granito (W3)	25	0,4	6000	0.20	300	52

z = profundidade

Os estratos de solo foram considerados com comportamento elástico linear e perfeitamente plástico tendo sido adoptado para os mesmos o critério de rotura de Mohr-Coulomb. O suporte primário foi considerado com comportamento elástico linear e isotrópico com um

coeficiente de Poisson igual a 0,2 e um módulo de elasticidade variável ao longo do eixo do túnel em função do tempo, dado pela expressão:

$$E_t = E_{28} \sqrt{\frac{t}{4.2 + 0.85t}} \quad (1)$$

em que E_t é o módulo de elasticidade para um dado tempo t , expresso em dias, de um betão que ao fim de 28 dias tem um módulo de elasticidade de E_{28} (Gomes, 1999).

Foi considerada uma velocidade média de escavação de 0,8m/dia.

5.3. Resultados

Os resultados aqui apresentados dizem respeito à evolução com o avanço da frente do assentamento máximo à superfície (Fig. 5), dos assentamentos nos extensómetros E_0 , E_3 e E_4 , nas ancoragens A, B e C (Fig. 6), dos perfis transversais dos assentamentos à superfície do terreno (Fig. 7) e do perfil transversal final dos assentamentos à superfície do terreno (Fig. 8).

Em todas as figuras são apresentados os valores medidos e os valores calculados.

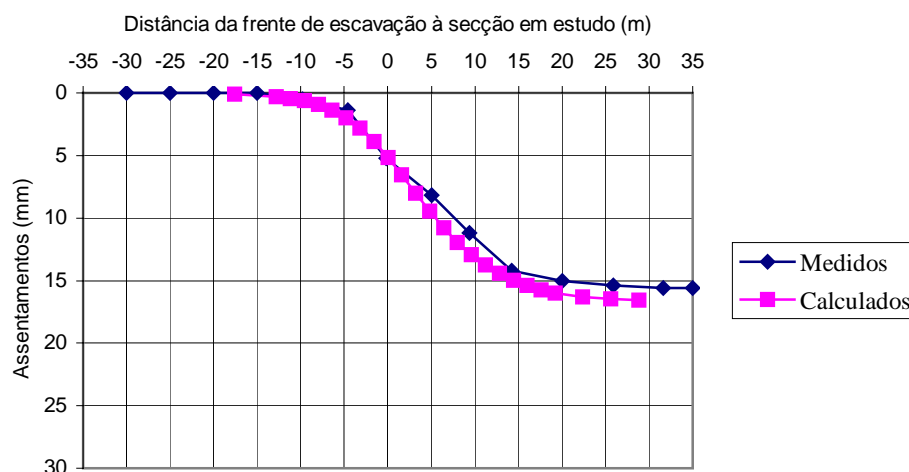


Figura 5 – Evolução com o avanço da frente do assentamento máximo à superfície

Como se pode constatar nas figuras 5 e 6 existe uma concordância razoável entre os valores medidos e os valores calculados dos assentamentos ao longo do processo construtivo. A única exceção a esta concordância acontece na ancoragem A do extensómetro E_4 . Neste caso o assentamento medido foi muito superior ao calculado sendo no final cerca de 2,5 vezes superior ao calculado. A diferença observada estará relacionada com as sobreescavações importantes que ocorreram no ombro do túnel nas proximidades da secção analisada.

Na Figura 7, as três curvas representadas dizem respeito a três momentos, a saber: na altura em que a frente atingiu a secção analisada, quando a frente já tinha avançado 5m em relação à secção analisada e quando a frente se encontrava muito afastada da secção analisada e, portanto, as deformações associadas à escavação podem ser consideradas desprezáveis. Também se pode constatar a existência de uma razoável concordância entre os valores medidos e os valores calculados sendo, no entanto, os assentamentos máximos calculados ligeiramente superiores aos medidos e a largura da bacia de subsidência observada algo maior do que a largura da bacia de subsidência obtida com base nos assentamentos calculados.

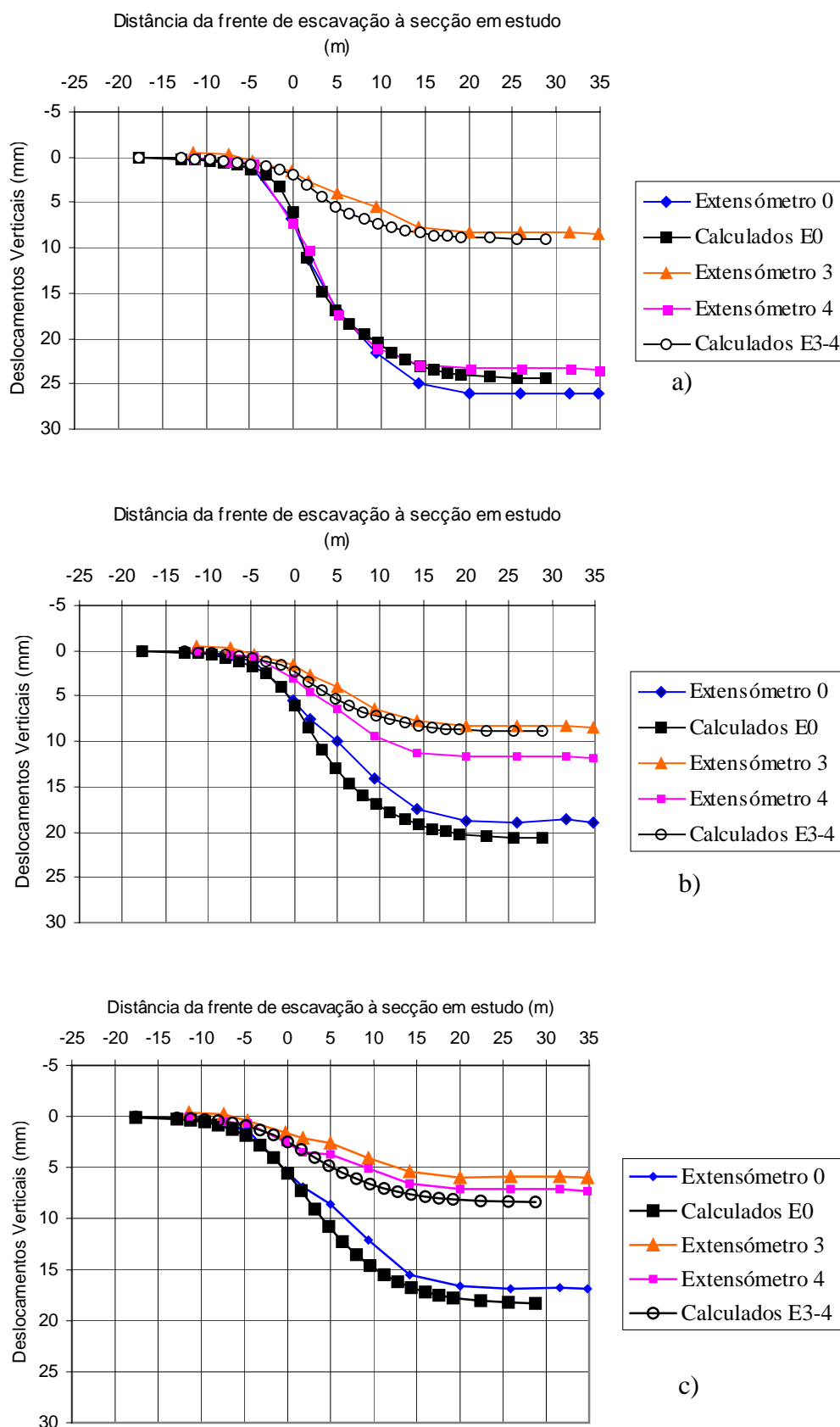


Figura 6 – Evolução com o avanço da frente dos assentamentos nos extensómetros E₀, E₃ e E₄ a) ancoragem A; b) ancoragem B; c) ancoragem C

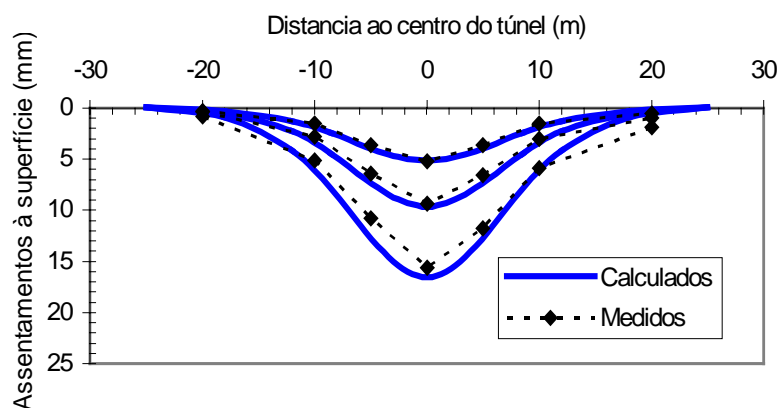


Figura 7 – Evolução dos perfis transversais dos assentamentos à superfície do terreno

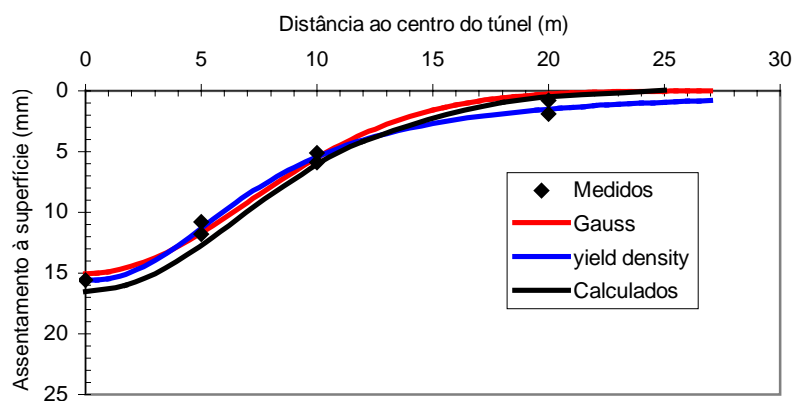


Figura 8 – Perfil transversal final dos assentamentos à superfície – comparação do perfil calculado com as curvas que melhor ajustam os dados da observação

Na Figura 8, onde se representa o assentamento final da superfície na secção transversal, os valores medidos foram ajustados por duas curvas (curva de Gauss e *Yield Density* (Celestino e Ruiz, 1998)) obtidas a partir da minimização dos quadrados dos desvios. Ambas as curvas ajustam bem os valores observados. No entanto, a *Yield Density* consegue reproduzir melhor a largura observada da bacia de subsidência.

Como os deslocamentos horizontais medidos no inclinómetro e calculados foram muito pequenos não é efectuada a comparação dos mesmos.

6. CONCLUSÕES

A análise tridimensional por elementos finitos de um tunel do Porto foi bem sucedida. Apesar de se ter efectuado uma fraca discretização do meio, devido a limitações computacionais, e ao uso de um modelo simples para modelar o comportamento dos diferentes estratos do terreno (Mohr-Coulomb), foi obtida uma concordância razoável entre os valores medidos e os valores calculados. O sucesso dos resultados obtidos é devido a uma boa simulação do processo construtivo conjugada com uma estimativa adequada dos parâmetros usados na definição do estado de tensão inicial e das características mecânicas dos terrenos.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia.

REFERÊNCIAS

Almeida e Sousa, J., Túneis em Maciços Terrosos. Comportamento e Modelação Numérica. Tese de doutoramento. Universidade de Coimbra, 1998.

Cardoso, A. S., A Técnica das Pregagens em Solos Aplicadas em Escavações. Métodos de Análise e Dimensionamento. Tese de doutoramento. Universidade do Porto, 1987.

Celestino, T. B., Ruiz, A. P. T., Shape of settlement troughs due to tunnelling. Through different types of soft ground. Felsbau 16, pp.118-121, 1998.

Ferreira da Costa, A., Concepção e Projecto de Túneis em Obras Viárias. Análise do Túnel 4 do Porto. Tese de mestrado. Universidade do Minho, 2001.

Gomes, R. A. M. P., Análise da interacção solo-suporte em túneis considerando o comportamento dependente do tempo. Tese de Mestrado em Geotecnia, Escola de Engenharia de S. Carlos da Universidade de S. Paulo, 1999.

Martins, F. F., Ferreira da Costa, A., Almeida e Sousa, J., Túnel 4 (Porto) – Análise tridimensional por elementos finitos. Geotecnia, n.º 99, p. 65-80, 2003.

Martins, F. F., Ferreira da Costa, A., Almeida e Sousa, J., Análise tridimensional de um túnel aberto num maciço de solo residual do granito. 1.º Congresso Brasileiro de Túneis e Estruturas Subterrâneas, S. Paulo, Brasil: Março 2004. Editado em CD-Rom.

Topa Gomes, A., Túneis urbanos sujeitos a solicitações não uniformes. O túnel do Largo do Carregal na cidade do Porto. Tese de Mestrado. Universidade do Porto, 1998.

Viana da Fonseca, A., Matos Fernandes, M., Cardoso, A.S., Martins, J. B., Portuguese experience on geotechnical characterisation of residual soils from granite, Proc. XIII ICSMFE, New Dehli, India, Vol.1, pp. 377-380. A. A. Balkema, Rotterdam, 1994.

Viana da Fonseca, A., Geomecânica dos Solos Residuais do Granito do Porto. Critérios para o Dimensionamento de Fundações Directas. Tese de doutoramento. Universidade do Porto, 1996.