

# ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DO COMPORTAMENTO DE UM TÚNEL SUPERFICIAL EM MEIO URBANO

## TRIDIMENSIONAL ANALYSIS OF THE BEHAVIOUR OF AN URBAN SHALLOW TUNNEL

Martins, Francisco F., *Universidade do Minho, Departamento de Engenharia Civil, Guimarães, Portugal*, [ffm@civil.uminho.pt](mailto:ffm@civil.uminho.pt)

Valente, Bruno, *AFA - Avelino, Farinha e Agrela, Lda, Calheta, Madeira, Portugal*, [bvalente@netmadeira.com](mailto:bvalente@netmadeira.com)

Almeida e Sousa, Jorge, *Universidade de Coimbra, Departamento de Engenharia Civil, Coimbra, Portugal*, [jas@dec.uc.pt](mailto:jas@dec.uc.pt)

### RESUMO

Trata-se da simulação numérica da abertura de um túnel superficial aberto em formações miocénicas de natureza argilo-siltosa, próximo da Estação do Oriente em Lisboa (Túnel DMC Norte no troço 96° do Metropolitano de Lisboa). O túnel, com um desenvolvimento longitudinal de 80m e um diâmetro equivalente de cerca de 11,5m, foi construído de acordo com os princípios do NATM. Os cálculos numéricos envolveram análises tridimensionais onde se tentou reproduzir a sequência completa da construção (fase de escavação e aplicação do suporte), tendo sido o comportamento mecânico dos solos reproduzido através de um simples modelo elástico perfeitamente plástico. Alguns dos resultados decorrentes dos cálculos são comparados com os fornecidos pela instrumentação da obra.

### ABSTRACT

This work deals with the numerical simulation of the construction of a shallow tunnel opened in clayey-silty miocenic deposits, near the Oriente metro station in Lisbon (DMC North tunnel link 96° from Lisbon metro). The tunnel, with a longitudinal length of 80m and an equivalent diameter of about 11,5m, was constructed according to NATM principles. The numerical calculations involved three-dimensional analyses, in which every effort was made to reproduce the entire construction sequence (excavation phase and support application). The mechanical behaviour of the soils was reproduced using an elastic perfectly plastic model. Some numerical results are compared with those obtained by the monitoring devices.

### 1. INTRODUÇÃO

O troço 96° do Metropolitano de Lisboa, inserido no plano de expansão da rede à Zona Oriental da cidade, tem 752m de comprimento e situa-se paralelamente à linha do Norte da CP, mantendo desta um afastamento médio em planta de 17m. Para a execução da obra estiveram activas duas ou três frentes de trabalho, duas com avanço de execução para Norte e a terceira para Sul, como se ilustra na Figura 1, que inclui a representação esquemática, em planta e em perfil, do traçado daquele troço.

O túnel DMC Norte, cujo comportamento se analisou numericamente, foi construído a partir do túnel dos ventiladores (TV), tendo uma extensão de 80m e uma secção transversal com um

diâmetro equivalente de cerca de 11,5m. O seu recobrimento médio é de, aproximadamente, 20m, existindo sobre o seu traçado três edifícios.

Neste artigo, depois de uma breve descrição da obra (condições geológicas e geotécnicas, processo construtivo e monitorização e observação) são apresentados, e confrontados com os experimentais, alguns dos resultados dos cálculos numéricos efectuados. Para estes cálculos recorreu-se a um programa de elementos finitos apropriado para a análise de equilíbrios tridimensionais.

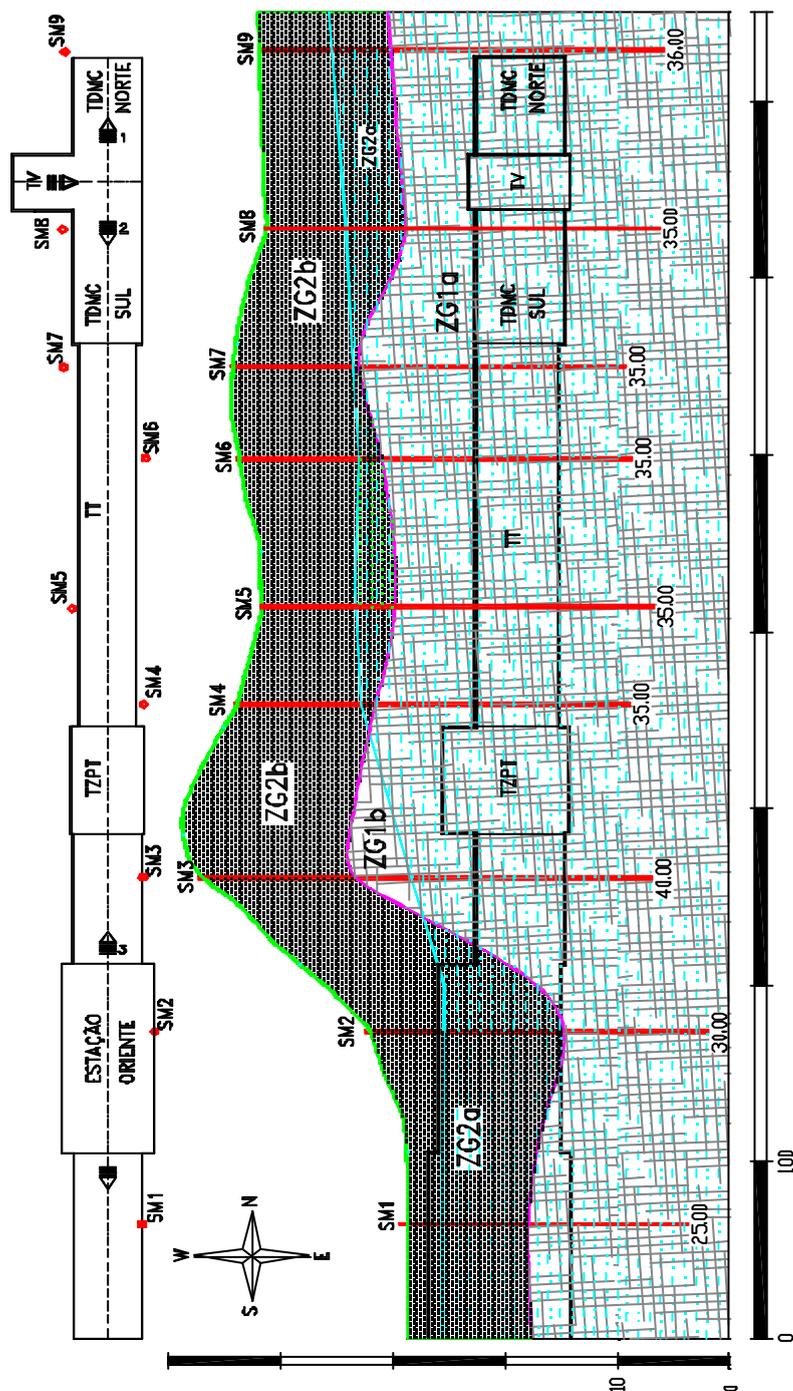


Figura 1 –Planta esquemática do traçado e perfil geotécnico do maciço.

## 2. CONDIÇÕES GEOLÓGICAS E GEOTÉCNICAS

O programa de prospecção, compreendendo a realização de nove sondagens de furação à rotação (SM1 a SM9, na Fig.1), revelou que o maciço é constituído por formações estratigraficamente atribuídas ao Miocénico, localmente recobertas por aterros ou depósitos de cobertura de idade Recente [1]. A formação Recente é constituída por aterros de espessura variável (entre 1,0 e 3,5m) e características diversas e por depósitos argilo-silto-arenosos acastanhados com raízes, fragmentos rochosos e materiais resultantes da ocupação local do solo (arruamentos, pavimentos, ocupação agrícola). As formações miocénicas, por sua vez, são de natureza essencialmente argilo-siltosa, com forte componente carbonatada e frequentes intercalações calco-margosas.

A caracterização geotécnica do maciço interessado pelas obras envolveu a realização de ensaios *in situ* e de ensaios laboratoriais, estes últimos executados sobre amostras colhidas nas sondagens efectuadas. Os ensaios *in situ*, efectuados no interior dos furos de sondagem, incluíram ensaios SPT, ensaios pressiométricos de tipo “Ménard” e ensaios de permeabilidade de tipo “Lefranc”. Para além disso, foram instalados piezómetros para controlo da variação dos níveis freáticos. Os ensaios laboratoriais incluíram ensaios de identificação, de determinação das propriedades físicas naturais e diferentes tipos de ensaios de caracterização mecânica (ensaios de corte directo, ensaios triaxiais e ensaios de compressão uniaxial).

Com a informação obtida, foram identificadas duas zonas geotécnicas distintas (ZG1 e ZG2), que, como a Figura 1 ilustra, foram ainda subdivididas em (ZG1a e ZG1b) e (ZG2a e ZG2b), conforme estivessem submersas ou não [1 e 2].

## 3. PROCESSO CONSTRUTIVO

O túnel DMC Norte foi executado através de um processo construtivo baseado no método NATM (Figura 2).

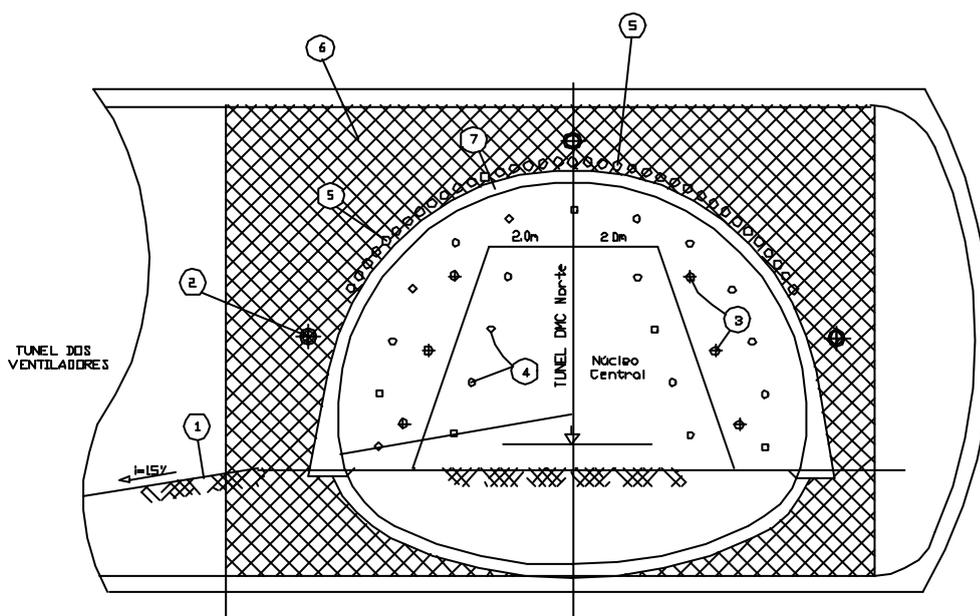


Figura 2 – Emboquilhamento do túnel DMC Norte a partir do Túnel dos Ventiladores (TV): 1-eixo do túnel; 2-dreno a vácuo; 3-drenos sub-horizontais; 4 – pregagens; 5-enfilagens (colunas de Jet Grouting); 6-betão projectado reforçado com malha de aço.

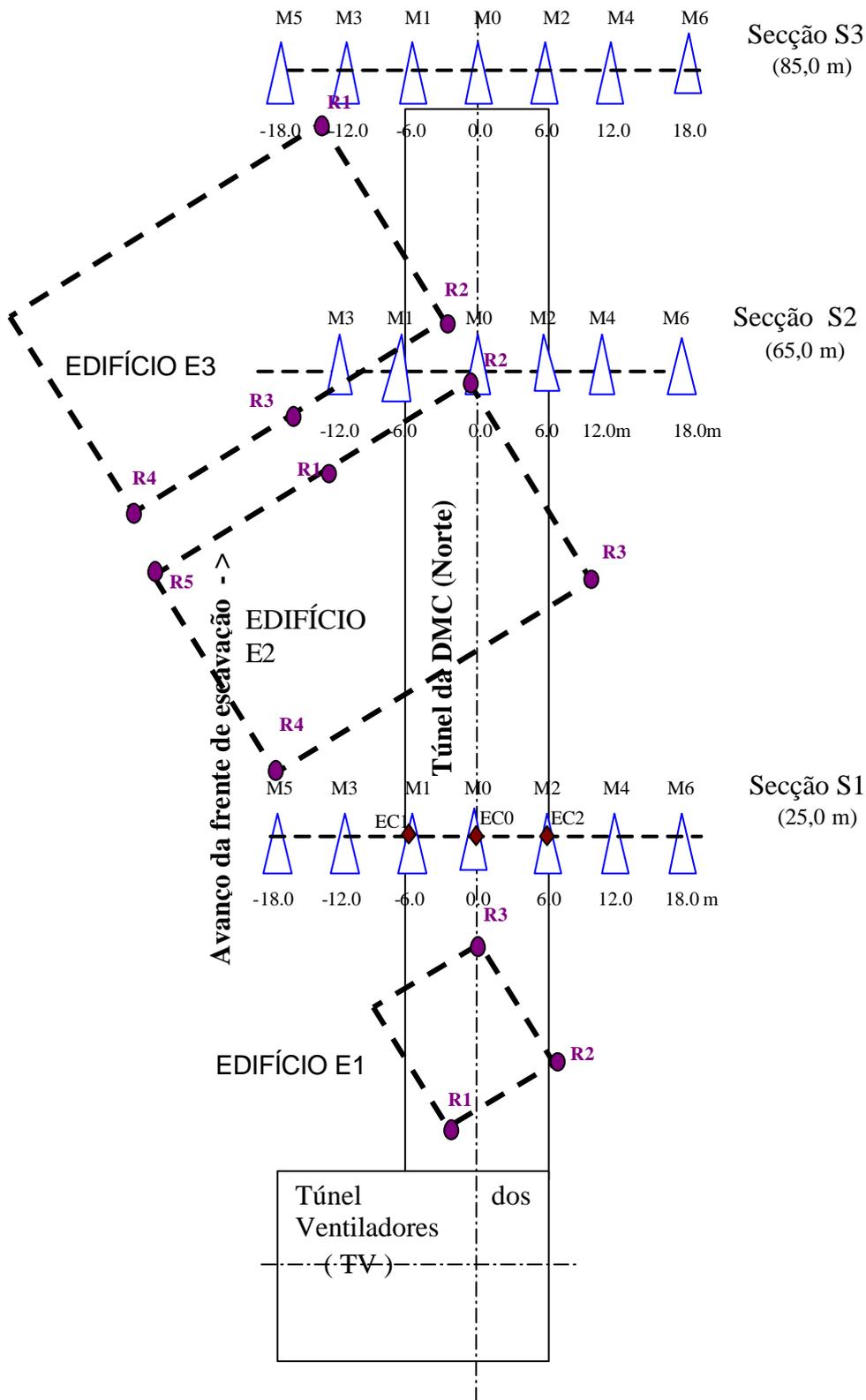


Figura 3 – Localização das secções principais de monitorização (Si), marcas topográficas (Mi), extensómetros (Eci) e reguas nos edifícios (Ri).

Os trabalhos foram efectuados a partir do túnel dos ventiladores (TV, na Fig.1) avançando sequencialmente, abóbada (metro a metro) e arco invertido definitivo em avanço de 2,0m, permanecendo um núcleo na frente de escavação com 2,0m de extensão.

O revestimento primário colocado consistiu na aplicação de cambotas metálicas (revestimento rígido) na fase da abóbada, ligadas por elementos também rígidos, recobertos por “malhassol” e betão projectado (revestimento flexível), admitindo-se três etapas de projecção até se atingir a espessura definida em projecto. Como complemento aos métodos de avanço de escavação, foram executados elementos de reforço e suporte da frente (colunas de JET armado com tubo “schedule”, pregagens e drenos), que definiram extensões de avanço em ciclos escavação/tratamento [3].

#### 4. MONITORIZAÇÃO E OBSERVAÇÃO

Para controlar o processo construtivo e a segurança das estruturas e serviços existentes na vizinhança das obras, foram definidas, no túnel DMC Norte, três secções principais de monitorização, como se ilustra na Figura 3.

Na Figura 4 encontra-se o esquema da disposição em perfil dos dispositivos instalados nessas secções: i) marcas topográficas à superfície para medir os deslocamentos verticais através de nivelamentos topográficos; ii) varões extensométricos com três pontos de ancoragem que permitiram medir os deslocamentos relativos entre pontos localizados à superfície e pontos situados no interior do maciço.

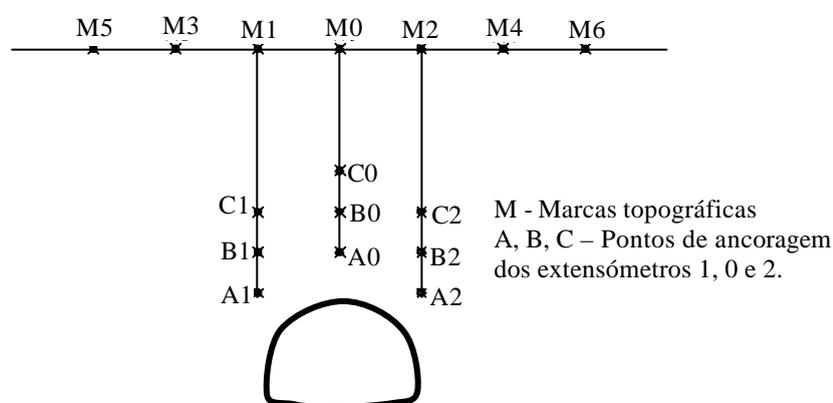


Figura 4 – Esquema da localização dos dispositivos de observação nas secções principais

Para além dos dispositivos acima indicados, foram ainda utilizados na monitorização do túnel piezómetros para medir os níveis freáticos, régua nos edifícios para medir as deflexões e bases colocadas no revestimento de betão para medições de convergências.

Na Figura 5 representa-se os perfis transversais dos assentamentos finais medidos nas três secções instrumentadas. A sua análise sugere alguns comentários:

- i) são menores os assentamentos medidos na secção S3, uma vez que ela não chega a ser escavada; de forma idêntica à verificada nas duas outras secções antes de serem escavadas, o assentamento máximo não acontece sobre o eixo do túnel (marca M0) mas sim nas marcas laterais, estando, provavelmente tal facto associado aos enfilagens (colunas de JET), que não ocupando a totalidade da abóbada restringem

- mais os movimentos na zona central, que serão então menores do que os verificados na zona dos hasteais;
- ii) na secção S2 é pequena a atenuação dos assentamentos com o afastamento do eixo de simetria, contribuindo, provavelmente, para isso a presença dos edifícios E2 e E3 (Figura 3), localizados na proximidade desta secção; na secção S1, menos influenciada pela presença dos edifícios, a forma da curva aproxima-se mais da tradicional curva de Gauss;
  - iii) os assentamentos observados em S1 são muito superiores (cerca de 400%) aos verificados na secção S2, tendo para isso contribuído a forte afluência de água que se verificou nas proximidades daquela secção, causando situações de instabilidade na abóbada e facilitando sobreescavações e erosão do núcleo; em consequência disso, houve nesta zona uma maior morosidade em todas as operações efectuadas, diminuindo o ritmo dos trabalhos e aumentando o tempo de colocação do sustimento.

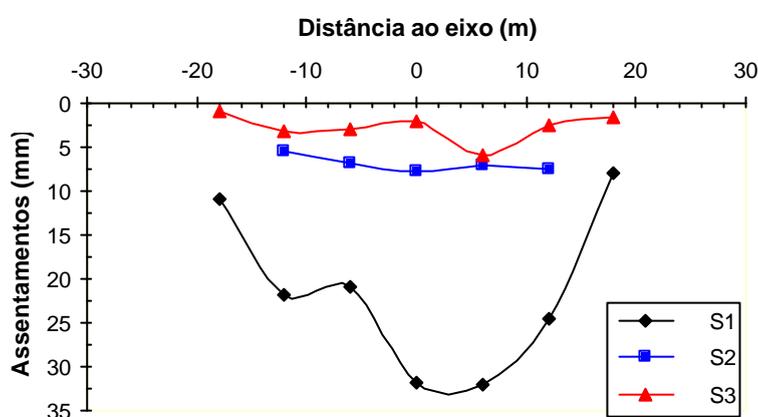


Figura 5 – Perfis transversais dos assentamentos finais observados

## 5. ANÁLISES POR ELEMENTOS FINITOS

### 5.1 Discretização do meio e simulação do processo construtivo

Os estudos numéricos foram efectuados usando um programa de elementos finitos desenvolvido nas universidades do Porto e Coimbra [4 e 5], direccionado para o cálculo geotécnico, e que permite simular a escavação de túneis com a consideração das diversas fases construtivas, de forma separada e sequencial, e modelar o comportamento mecânico dos vários materiais e suas interfaces através de vários modelos constitutivos de complexidade variável.

Na Figura 6 é apresentada uma parte da malha de elementos finitos usada nos cálculos efectuados. O comprimento total da malha definida teve em conta a extensão longitudinal do túnel, considerando-se, para além do fim da escavação, 45m (aproximadamente 4 diâmetros) de maciço. A sua secção transversal tem uma largura de 100m e uma altura de 52m. Na fronteira inferior da malha foram impedidos quaisquer deslocamentos, enquanto que nas fronteiras laterais foram impedidos os deslocamentos horizontais na respectiva direcção perpendicular.

Tanto o maciço envolvente do túnel como os edifícios, admitidos estes com uma altura total de 17m, foram discretizados com elementos isoparamétricos de interpolação linear (8 pontos nodais). A capacidade limitada do computador usado não permitiu o uso de elementos de interpolação mais elevada nem uma discretização do meio mais refinada.

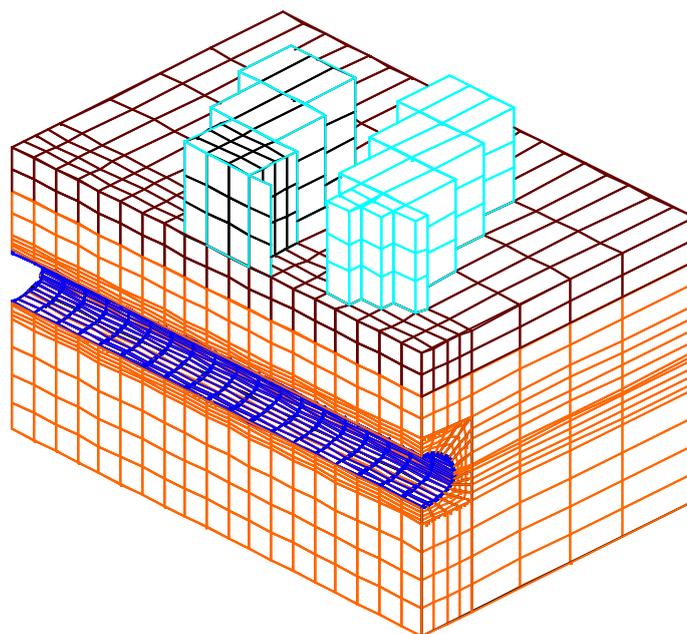


Figura 6 – Parte da malha tridimensional adoptada nos cálculos

Os cálculos foram efectuados em 21 incrementos simulando a escavação e o sustimento total do túnel. Depois de nos dois primeiros incrementos se ter simulado a escavação de 8m do túnel (em secção total), nos incrementos seguintes simulou-se um novo avanço de 4m da escavação e a colocação do suporte a 8m da frente. No último incremento de cálculo considerou-se a instalação do suporte nos últimos 8m de túnel.

## 5.2 Cálculos efectuados e parâmetros adoptados

Foram efectuados 4 cálculos. Nos cálculos 1 e 2 os parâmetros caracterizadores das propriedades mecânicas das formações interessadas pela abertura do túnel foram considerados constantes em profundidade e definidos a partir da média dos valores obtidos nos diferentes ensaios realizados (SPT, Ménard e triaxiais não drenados) [2]. Estes dois cálculos diferem um do outro porque no primeiro a superfície do terreno foi considerada livre.

Nos cálculos 3 e 4 os parâmetros caracterizadores das propriedades mecânicas das formações mais directamente interessadas pela abertura do túnel (zona geotécnica ZG1) foram considerados variáveis em profundidade e estabelecidos com base nos valores mais baixos encontrados nos ensaios [2].

Em todos os cálculos se admitiu que o estado de tensão inicial era geostático. Para a sua determinação considerou-se para as duas zonas geotécnicas os valores do peso volúmico e do coeficiente de impulso em repouso indicados nos Quadros 1 e 2. Em relação aos valores deste último parâmetro, deve salientar-se que eles foram estimados tomando em conta os resultados de alguns ensaios e os valores obtidos em formações similares noutras estruturas subterrâneas do metropolitano de Lisboa [6].

Quadro 1 - Parâmetros adoptados na definição do estado de tensão inicial e características mecânicas adoptadas para o estrato ZG2

$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E_u$ (MPa)	$c_u$ (kPa)	$K_0$	$\nu$
19	31,5	100	0,6	0,45

Quadro 2 - Parâmetros adoptados na definição do estado de tensão inicial e características mecânicas adoptadas para o estrato ZG1

Cálculos	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$E_u$ (MPa)	$c_u$ (kPa)	$K_0$	$\nu$
1 e 2	20,0	80	200	0,8	0,45
3	20,0	29,7+2,2.z	53+3,9.z	0,8	0,45
4	20,0	15,9+1,2.z	53+3,9.z	0,8	0,45

z = profundidade em metros

Aos materiais geotécnicos foi atribuído um comportamento elástico linear perfeitamente plástico, definido até à rotura por um módulo de deformabilidade independente dos níveis de tensão ou de deformação. Admitindo que a escavação se processou em condições não drenadas, as análises foram feitas em tensões totais, sendo a rotura controlada pelo critério de Tresca. Também nos Quadros 1 e 2 se incluem os parâmetros caracterizadores do modelo utilizado. É de referir que a única diferença entre os cálculos 3 e 4 reside no valor do módulo de deformabilidade considerado. No primeiro caso, o parâmetro M que relaciona o módulo de deformabilidade com o valor da resistência não drenada,  $c_u$ , vale 560 e no segundo apenas 300.

No que respeita ao suporte, admitiu-se um comportamento elástico linear e isotrópico, caracterizado pelos seguintes valores do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson:  $E=10\text{GPa}$  e  $\nu=0,2$ .

Também para o material representativo dos edifícios foi admitido um comportamento elástico, linear e isotrópico tendo sido adoptado para o módulo de elasticidade um valor intermédio entre o módulo de elasticidade do betão e o módulo de elasticidade da alvenaria ( $E=9\text{GPa}$ ). Para o coeficiente de Poisson,  $\nu$ , foi atribuído o valor 0,2, correspondente ao coeficiente de Poisson do betão. O peso volúmico atribuído a este material foi de  $5\text{kN/m}^3$  por forma a obter-se uma pressão na base, ao nível do terreno, de  $85\text{kPa}$ .

### 5.3 Resultados

O confronto dos valores dos assentamentos superficiais finais obtidos nos dois primeiros cálculos, para as secções S2 e S3, com os observados é apresentado nas Figuras 7 e 8. O exame destas figuras permite constatar que:

- i) é inequívoca a influência da consideração da rigidez das estruturas existentes à superfície nos valores dos assentamentos e na forma dos respectivos perfis transversais;
- ii) a consideração dos edifícios aumenta os assentamentos superficiais verificados e, uma vez que eles não se encontram dispostos simetricamente, torna assimétrica a respectiva curva;
- iii) tanto num como noutra secção, os valores decorrentes dos cálculos são superiores aos experimentais;
- iv) na secção 2, na zona alvo da monitorização (12 m para cada um dos lados do eixo), a forma calculada do perfil transversal dos assentamentos aproxima razoavelmente a observada;

- v) na aproximação numérica o efeito da escavação faz-se sentir até distâncias ao contorno da abertura significativamente superiores às reais.

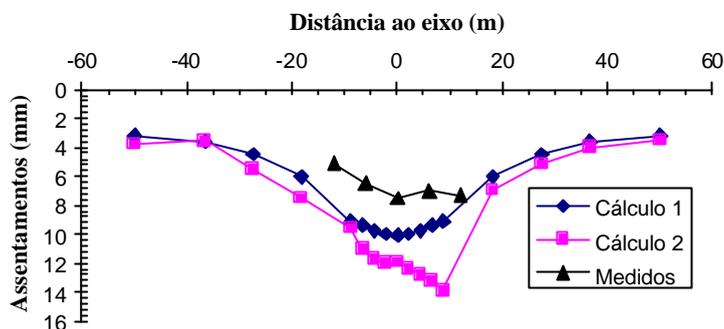


Figura 7 – Secção S2 – comparação dos assentamentos superficiais finais decorrentes dos cálculos 1 e 2 com os experimentais

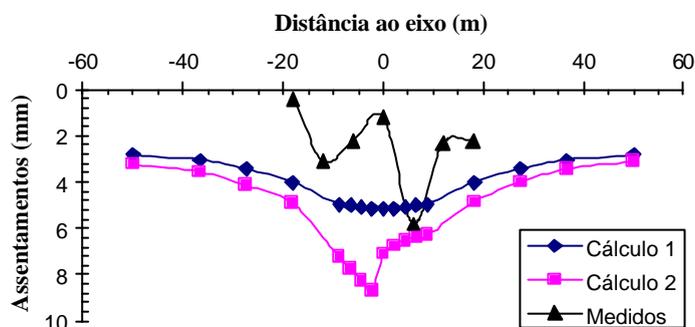


Figura 8 – Secção S3 – comparação dos assentamentos superficiais finais decorrentes dos cálculos 1 e 2 com os experimentais

A influência da presença dos edifícios nos movimentos induzidos pela escavação também é bem visível na Figura 9. Nela representa-se, para a secção S2, a evolução com o avanço da escavação dos deslocamentos horizontais à superfície do terreno perpendiculares ao eixo do túnel obtida no cálculo 2, bem como os valores finais obtidos no cálculo 1. A rigidez axial dos edifícios faz decrescer os deslocamentos horizontais induzidos, logo as correspondentes deformações horizontais. Repare-se, ainda, que sobre o eixo do túnel o deslocamento horizontal deixa de ser nulo, verificando-se um movimento para a direita do túnel devido à localização, à esquerda, dos edifícios.

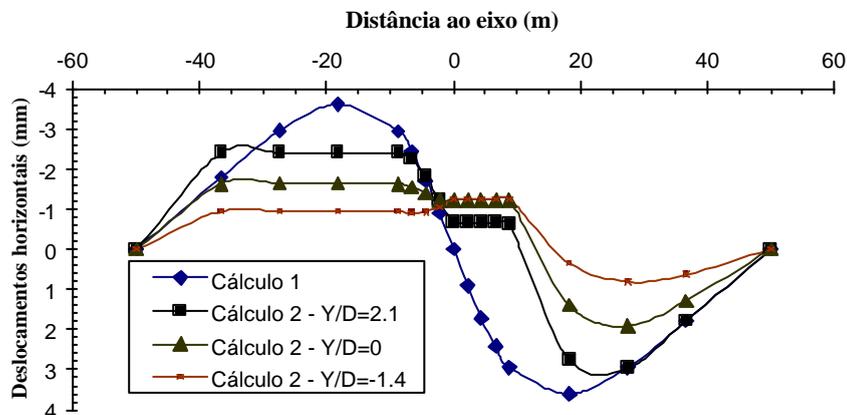


Figura 9 – Secção S2 – deslocamentos horizontais à superfície obtidos nos cálculos 1 e 2

Em relação à secção S1, verifica-se que os movimentos decorrentes dos dois primeiros cálculos são manifestamente inferiores aos observados em obra. Numa tentativa de se simular o comportamento observado nas proximidades desta secção, foram realizados os cálculos 3 e 4, considerando-se, como já se referiu anteriormente, valores mais baixos para os parâmetros mecânicos (resistência e deformabilidade) das formações mais interessadas pela abertura do túnel.

Na Figura 10 compara-se os perfis dos assentamentos à superfície finais obtidos nestes dois últimos cálculos com os experimentais. A análise da figura permite verificar que a curva obtida no cálculo 4 aproxima bastante bem os assentamentos máximos fornecidos pela instrumentação, embora a sua forma se afaste um pouco da observada. Com efeito, na curva numérica é menos acentuada a diminuição dos assentamentos com a distância ao eixo do túnel, pelo que é muito maior do que a observada a largura da faixa superficial influenciada pela escavação e menor a distorção.

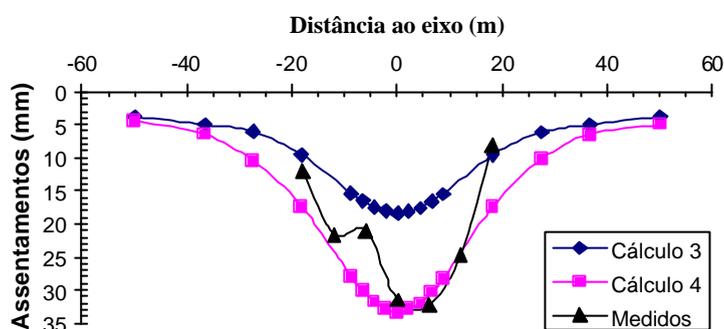


Figura 10 – Secção S1 – comparação dos assentamentos superficiais finais decorrentes dos cálculos 3 e 4 com os experimentais

Na Figura 11 representa-se a evolução com a distância à frente da escavação da secção S1 dos assentamentos máximos à superfície do terreno. Para além da curva experimental, ilustra-se também as curvas resultantes dos cálculos 3 e 4. Como se pode constatar, a aproximação conseguida não é famosa. Com efeito, os assentamentos adiante da frente são bem simulados pelo cálculo 3, que entretanto subestima significativamente o assentamento final, exactamente ao contrário do que acontece com o cálculo 4.

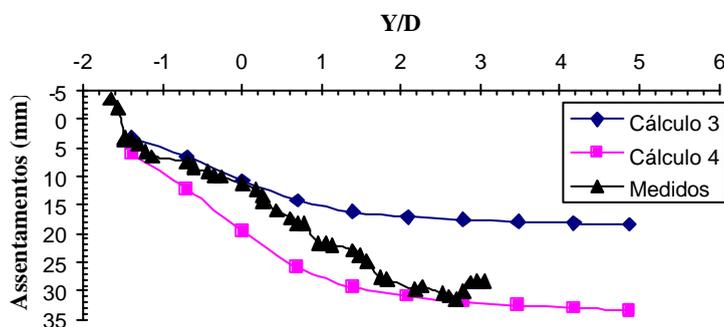


Figura 11 – Secção S1 – comparação da evolução do assentamento máximo à superfície do terreno decorrente dos cálculos 3 e 4 com a observada

## 6. CONCLUSÕES

A aplicação de um modelo numérico tridimensional na simulação da abertura de um túnel superficial nas formações miocénicas de Lisboa permitiu realçar a importância de que se reveste a consideração da rigidez das estruturas existentes na vizinhança da obra na estimativa dos movimentos induzidos pela escavação à superfície do terreno. Tanto os valores desses movimentos (assentamentos e deslocamentos horizontais), como a forma das respectivas curvas, podem ser significativamente alterados pela presença daquelas estruturas. No caso em estudo, constatou-se que, na secção mais próxima dos edifícios existentes (S2), a consideração destes originou um ligeiro aumento nos assentamentos superficiais e uma diminuição dos deslocamentos horizontais e, sobretudo, das respectivas deformações, cujos valores são praticamente nulos nas zonas subjacentes aos edifícios.

No que concerne à comparação dos resultados numéricos com os experimentais, verificou-se que, nos cálculos em que os parâmetros caracterizadores das propriedades mecânicas das diversas formações foram definidos a partir da média dos valores obtidos nos diferentes ensaios realizados, se obteve uma concordância minimamente razoável em duas das três secções instrumentadas (S2 e S3).

Na secção S1, onde se verificou durante os trabalhos uma muito forte afluência de água, uma concordância razoável entre os resultados numéricos e os experimentais foi conseguida nos cálculos em que se adoptou para os parâmetros mecânicos das formações mais directamente interessadas pela escavação os valores mais baixos encontrados nos ensaios.

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia – Programa POCTI/ECM/2521/2001 – Concepção, Projecto e Reabilitação de Túneis em Obras Viárias. Para além de agradecer esse apoio, os autores gostariam também de agradecer à empresa TECNASOL, FGE, pela cedência dos Relatórios da Prospecção Geotécnica, com os resultados dos ensaios realizados e dos Relatórios da Instrumentação Mensal e Final da Observação da Obra, sem os quais não teria sido possível o estudo e comparação dos resultados obtidos na simulação numérica com os resultados observados em obra.

## REFERÊNCIAS

- [1] TECNASOL, S.A., Relatório da prospecção geotécnica. Metropolitano de Lisboa, EP. – Estação do Oriente EXPO'98 (1995).
- [2] Valente, B.S., Análise do Comportamento de um Túnel Superficial. Tese de Mestrado. Universidade do Minho (2003).
- [3] TECNASOL, S.A., Relatório final da instrumentação do troço 96º do Metropolitano de Lisboa (1998).
- [4] Cardoso, A. S., A Técnica das Pregagens em Solos Aplicadas em Escavações. Métodos de Análise e Dimensionamento. Tese de doutoramento. Universidade do Porto (1987).
- [5] Almeida e Sousa, J., Túneis em Maciços Terrosos. Comportamento e Modelação Numérica. Tese de doutoramento. Universidade de Coimbra (1998).
- [6] Sousa Coutinho, A. G.; Marques, M.; Costa, A. e Veiga, J., Ensaio pressiométricos na zona da estação da alameda. Trabalhos realizados, interpretação e resultados dos ensaios. Local: Alameda/IST – Relatório 221/96 – NF. Local: Alameda/Império – Relatório 225/96 – NF. LNEC, Lisboa (1996)