

OBSERVAÇÃO DO TÚNEL CIDADE UNIVERSITÁRIA - ENTRE CAMPOS DA REDE DO METROPOLITANO DE LISBOA*

Monitoring of a tunnel of the Lisbon Metro network

por

RUI M. CORREIA**

JOAQUIM P. BARRETO***

RESUMO — Este trabalho diz respeito à *observação do comportamento* de um *túnel* da rede do Metropolitano de Lisboa, no troço Cidade Universitária - Entre Campos.

Para além de uma referência às principais características do túnel, incluindo as condições geológicas e geotécnicas ocorrentes, é feita uma descrição do sistema de observação instalado e são apresentados e discutidos os principais resultados das medições.

Os resultados de uma *modelação numérica* efectuada, respeitante aos efeitos da construção do túnel numa das cinco secções instrumentadas, são também apresentados e comparados com os valores das medições.

SYNOPSIS — The paper deals with the *instrumentation* and *monitoring* of a *subway tunnel* in Lisbon.

Reference is made to the main characteristics of the tunnel, including the geological and geotechnical conditions. The instrumentation arrangements are described and the main results of the measurements are presented and discussed.

The results of a *numerical modelling* of the construction of the tunnel at one of the five instrumented sections are also presented and compared with the measurements.

1 — INTRODUÇÃO

O 45.º troço da rede do Metropolitano de Lisboa (Fig. 1) está integrado na linha n.º 1 e liga as estações Cidade Universitária e Entre Campos. Com uma extensão de 1196 m, foi executado a céu aberto nos 50 m contíguos à estação Cidade Universitária e nos 131 m antes da estação Entre Campos, estes últimos já construídos na 1.ª fase de instalação do Metropolitano. A parte restante do troço, com um comprimento de 1015 m, foi executada em túnel, tendo os trabalhos decorrido entre Março de 1984 e Março de 1986 (Metropolitano de Lisboa, 1983).

* Trabalho recebido em Junho de 1987. A discussão do trabalho está aberta por um período de três meses.

** Engenheiro Civil, Investigador Principal do Laboratório Nacional de Engenharia Civil.

*** Engenheiro Civil, Metropolitano de Lisboa.

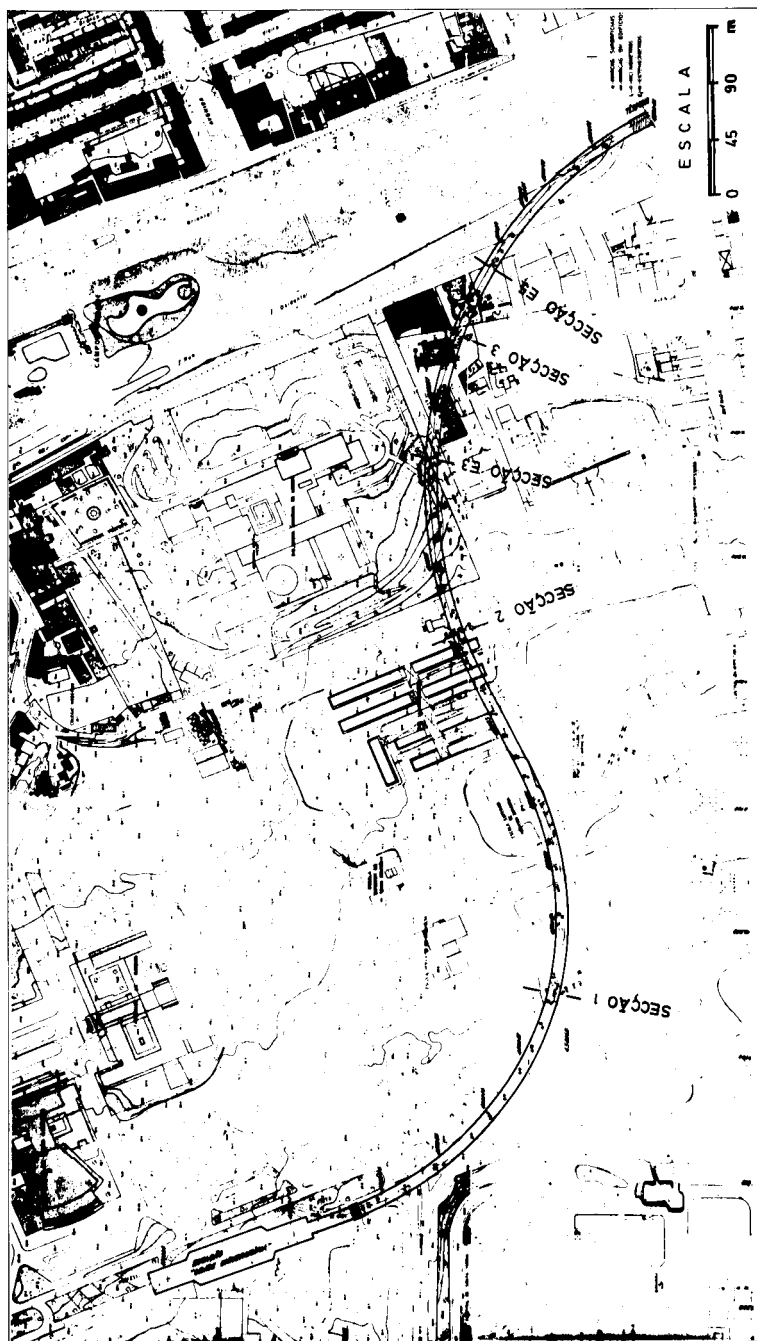
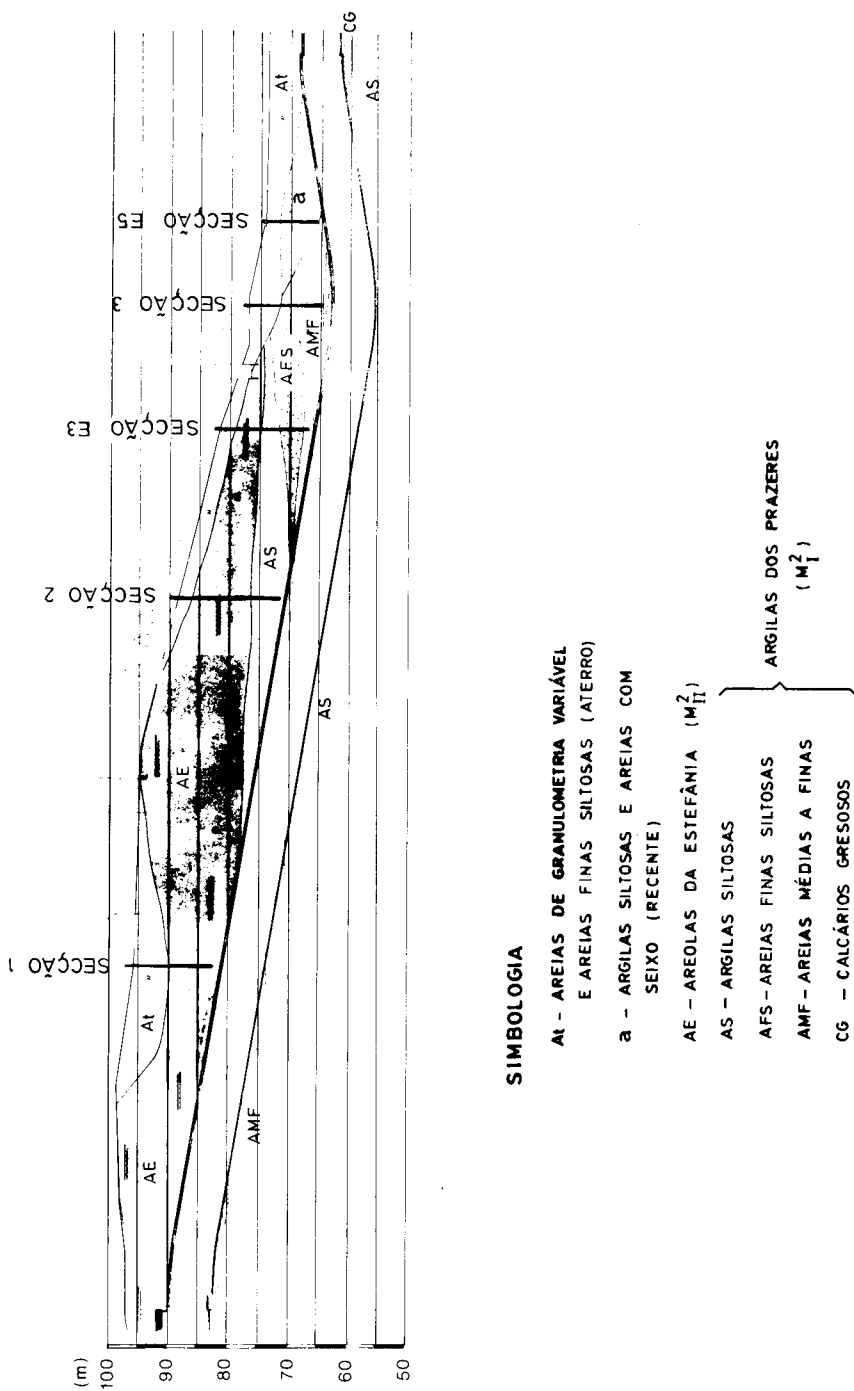


Fig. 1 — Planta de localização



SIMBOLOGIA

At - AREIAS DE GRANULOMETRIA VARIÁVEL

E AREIAS FINAS SILTOSAS (ATERRO)

a - ARGILAS SILTOSAS E AREIAS COM
SEIXO (RECENTE)

AE - AREOLAS DA ESTEFÂNIA (M_{II}²)

AS - ARGILAS SILTOSAS

AFS - AREIAS FINAS SILTOSAS

AMF - AREIAS MÉDIAS A FINAS

CG - CALCÁRIOS GRESOSOS

Fig. 2 — Corte longitudinal

Com a finalidade de controlar a segurança da obra durante a fase construtiva e de colher informações que pudessem vir a revelar-se úteis (quer para a obra em curso quer para obras futuras), o Metropolitano de Lisboa decidiu proceder, em colaboração com o Laboratório Nacional de Engenharia Civil, à observação do comportamento do referido túnel (Correia, 1987).

2 — CONDIÇÕES GEOLÓGICAS E GEOTÉCNICAS

2.1 — Geologia

Os trabalhos de prospecção realizados com vista à caracterização dos terrenos interessados pela construção do túnel reconheceram a seguinte sequência estratigráfica e litológica, esquematizada no perfil geológico longitudinal que se apresenta na Fig. 2:

Recente

- Aterros constituídos por areias de granulometria variável com fragmentos líticos e areias finas siltosas. Estão representados ao longo de todo o traçado por uma camada superficial com espessura variável que atinge os 6,0 m.
- Aluviões constituídas por argilas siltosas, siltes argilosos e areias médias e grosseiras com seixo. A sua localização é na antiga Ribeira de Entre Campos, onde atingem a espessura máxima de 6,5 m.

Miocénico

- *Burdigaliano Médio* — Areolas da Estefânia (M_{II}^2), constituídas por areias finas siltosas, com nódulos calcário-gresosos e níveis de grés calcários fossilíferos. Esta unidade, subjacente aos aterros superficiais, está largamente representada no recobrimento do túnel, desenvolvendo-se ao longo de cerca de dois terços da extensão total do traçado (ver Fig. 2) e chegando a atingir a espessura de 17 m.
- *Burdigaliano Inferior* — Argilas dos Prazeres (M_I^2): argilas siltosas e siltes argilosos com níveis fossilíferos, areias finas siltosas e siltes arenosos, areias médias a finas com restos de conchas e calcários gresosos. Nesta unidade encontram-se fundamentalmente solos de granulometria fina, argilo-siltosos, repartidos por dois horizontes, com comportamento rijo, que intercalam uma camada arenosa com uma espessura de cerca de 2,0 m. A escavação do túnel interessou as Argilas dos Prazeres ao longo de todo o traçado, sendo de salientar que, com excepção dos primeiros 200 m (em que a escavação também interessou as Areolas da Estefânia) e dos 100 m finais (em que foram também escavados aluviões e aterros), a secção

do túnel andou sempre no seu interior. A partir dos 200 m iniciais esta unidade estende-se também ao recobrimento do túnel, onde a sua espessura chega a atingir aproximadamente 10 m.

2.2 — Hidrogeologia

O dispositivo hidrogeológico associado ao modelo geológico descrito caracteriza-se pela presença de água nos horizontes de granulometria mais grosseira e nalguns níveis fossilíferos.

Os aquíferos mais representativos estabeleceram-se na base das Areolas da Estefânia (M_{II}^2), nas camadas arenosas intercaladas nas Argilas dos Prazeres (M_I^2) e na base da unidade aluvionar. O aquífero estabelecido nas passagens arenosas das Argilas dos Prazeres foi sem dúvida, pela sua localização e produtividade, o que mais condicionou a execução dos trabalhos e o comportamento do conjunto obra-maciço.

2.3 — Caracterização geotécnica

Durante o reconhecimento geotécnico foram realizados ensaios "in situ" e colhidas amostras para a realização de ensaios laboratoriais.

Os ensaios "in situ" destinados à determinação das características de resistência e deformabilidade dos solos do maciço foram os seguintes:

- Ensaios de penetração dinâmica (SPT);
- Ensaios pressiométricos; e
- Ensaios de carga sobre placa.

Foram ainda realizados ensaios de permeabilidade "in situ", quer do tipo Lefranc quer através de bombagem com medição dos níveis piezométricos.

Com as amostras colhidas foram realizados ensaios em laboratório que permitiram as seguintes determinações:

- Características ponderais;
- Identificação, através de peneiração por via húmida e dos limites de consistência de Atterberg;
- Características de deformabilidade e resistência com base em ensaios de compressão triaxial; e
- Permeabilidade por intermédio de ensaio com carga constante.

3 — CARACTERÍSTICAS DO TÚNEL

O túnel foi concebido para via dupla, apresentando a sua secção transversal as seguintes características principais (Fig. 3):

- Abóbada constituída por um arco de 3 centros com 3,70 m de flecha interior;
- Largura útil ao nível das nascenças do arco 8,00 m;
- Pés-direitos verticais com 2,80 m de altura;
- Soleira abobadada com aproximadamente 1,00 m de flecha;
- Altura máxima da escavação 7,65 m;
- Largura máxima da escavação 10,40 m;
- Área total de escavação aproximadamente 63,0 m².

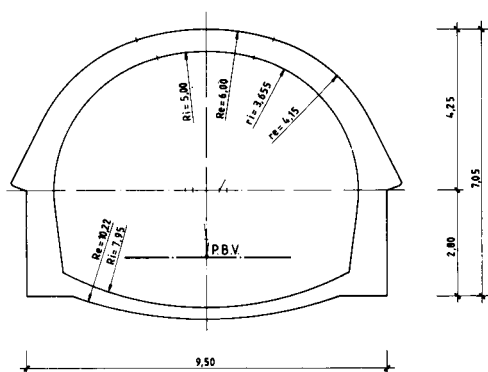


Fig. 3 — Secção tipo

4 — PROCESSO CONSTRUTIVO

Apresenta-se resumidamente o processo construtivo levado a cabo na execução do túnel. A secção do túnel foi executada nas três fases a seguir indicadas:

- Execução da abóbada;
- Execução dos pés-direitos; e
- Execução da soleira.

A escavação da calote superior foi executada ao abrigo de um escudo metálico tipo Bernold constituído por 22 lanças, cada uma com 0,50 m de largura e 7,40 m de comprimento, que avançam individualmente impulsionadas por um sistema hidráulico.

A betonagem do arco foi executada, por troços de 2,20 m, contra a cauda daquelas lanças, as quais mantêm a face exterior em contacto com o terreno. O espaço deixado

entre o betão da abóbada e o terreno, quando se processou o avanço das lanças, foi posteriormente cheio através de injeção de argamassa e calda de cimento.

Os pés-direitos foram executados a uma distância da frente que permitisse a execução da 1.^a fase em boas condições. A execução dos pés-direitos foi feita através da abertura de poços com 3,0 m de comprimento e betonagem imediata contra o terreno.

A soleira foi executada em último lugar, com desfasamento da frente da ordem dos 150 m.

Na Fig. 4 apresenta-se uma fotografia da execução da obra na zona da frente.



Fig. 4 — Execução da obra na zona da frente

5 — SISTEMA DE OBSERVAÇÃO

Tendo em conta as condições geológicas e geotécnicas ocorrentes, a ocupação superficial ao longo do traçado e as características do túnel, foi definido um plano de observação que consistiu em:

- Medição, por meios topográficos, dos deslocamentos verticais de cerca de 50 marcas distribuídas ao longo do traçado;
- Medição, por meio de varões extensométricos, de deslocamentos relativos, segundo a vertical, entre a superfície do terreno e pontos do interior do maciço situados acima do coroamento do túnel, a diversas profundidades;
- Medição, por meios inclinométricos, de deslocamentos horizontais do maciço envolvente do túnel;
- Medição, por meio de convergenciómetro de fita, de distâncias entre marcas instaladas no intradorso do revestimento do túnel.

Na Fig. 5 é apresentado um corte transversal segundo a secção 3, mostrando a localização dos dispositivos de observação.



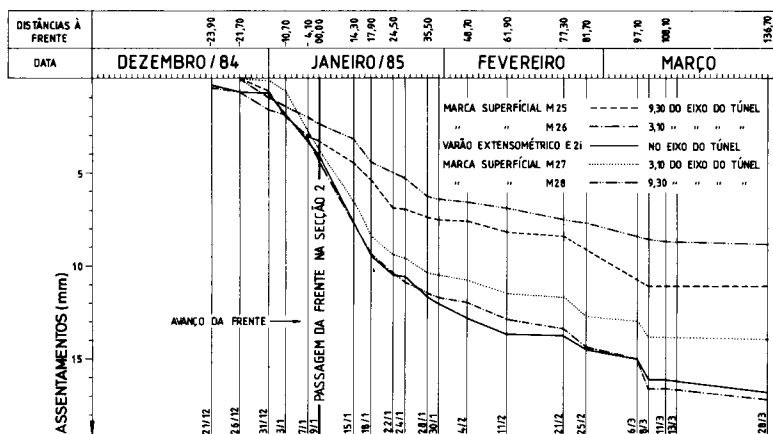
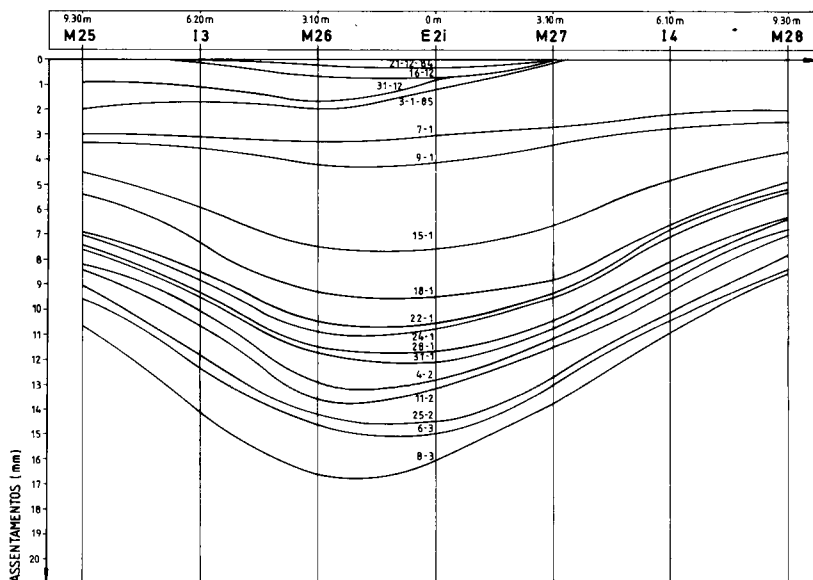
- 15, 16 - TUBOS INCLINOMÉTRICOS
E4i, E4s - VARÕES EXTENSOMÉTRICOS
1, 2, 3 - MARCAS PARA MEDIÇÃO
DE CONVERGÊNCIAS

Fig. 5 — Dispositivos de observação na secção 3

6 — RESULTADOS OBTIDOS

6.1 — Deslocamentos verticais à superfície

Nas Figs. 6 a 9 podem ver-se os resultados da medição de deslocamentos superficiais na secção 2 (Figs. 6 e 7) e na secção 3 (Figs. 8 e 9).



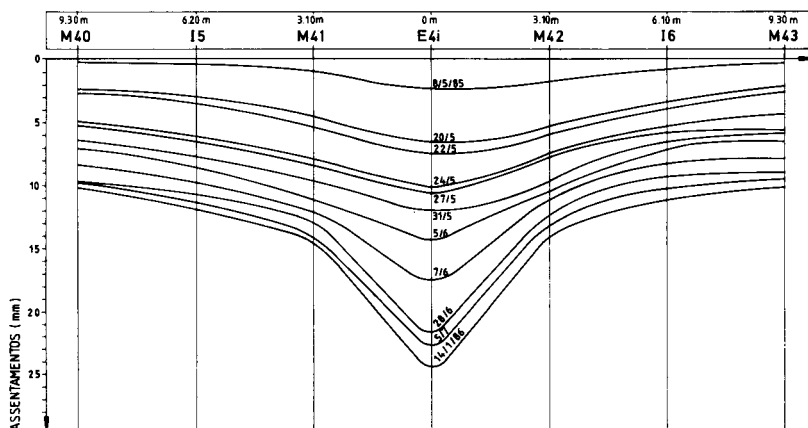


Fig. 8 — Curvas de assentamentos à superfície na secção 3

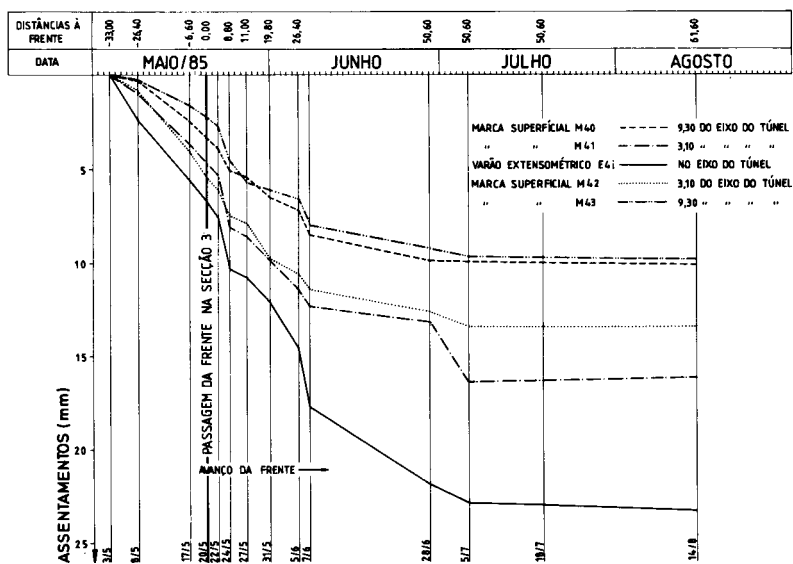


Fig. 9 — Evolução dos assentamentos de algumas marcas superficiais na secção 3

São apresentadas quer as curvas transversais de assentamentos superficiais em diversas datas (Figs. 6 e 8) quer as curvas que representam a evolução dos assentamentos de diversas marcas quando da passagem da frente de escavação pela secção (Figs. 7 e 9).

É possível verificar que:

- Como é habitual neste tipo de obras, os perfis transversais de assentamentos exibem (menos acentuadamente na secção 2) a forma de curvas de Gauss.
- Os assentamentos máximos foram da ordem dos 18 e dos 24 mm, respectivamente na secção 2 e na secção 3.
- Na generalidade das marcas, as curvas que traduzem a evolução dos assentamentos exibem taxas de variação máximas no período de alguns dias que se segue à passagem da frente de escavação pela secção.

A fim de ilustrar a possibilidade de aproximação dos perfis transversais de assentamentos por meio de curvas de Gauss, apresenta-se na Fig. 10 a curva desse tipo que melhor se ajusta (por um critério de minimização da soma dos quadrados dos desvios) aos resultados obtidos na secção 3, em 85-05-31 (com a frente de escavação situada a cerca de 20 m da secção). Recordar-se que a expressão analítica das curvas de Gauss é:

$$s = s_{max} \exp \left(-\frac{x^2}{2i^2} \right)$$

onde s é o assentamento à distância x do eixo de simetria, s_{max} é o assentamento máximo (no eixo de simetria) e i é o valor de x correspondente ao ponto de inflexão da curva.

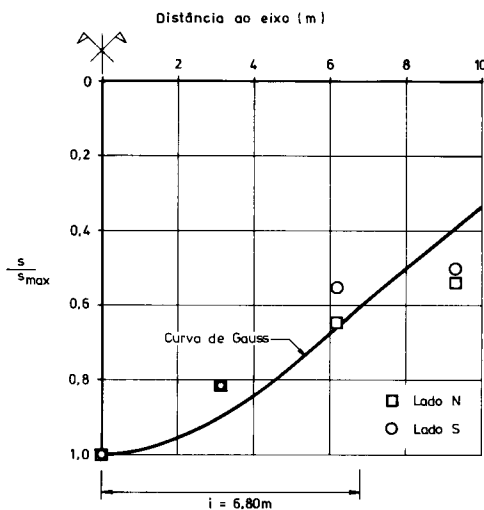


Fig. 10 — Assentamentos superficiais medidos na secção 3, em 85-05-31: aproximação por meio de uma curva de Gauss

Por outro lado, na Fig. 11 apresenta-se a localização do ponto representativo da curva da Fig. 10 no diagrama, proposto por Peck (1969), que relaciona a largura da curva de assentamentos com a profundidade relativa do túnel. Conforme se pode verificar, a localização do referido ponto (na transição entre argilas muito rijas e argilas rijas), está de acordo com as condições geológicas e geotécnicas na vizinhança da secção 3.

Ainda em relação à medição de deslocamentos verticais à superfície é de salientar que na secção E5 se verificou um assentamento máximo (da ordem dos 12 cm) muito superior ao registado nas restantes secções. Tal facto está relacionado com a natureza das formações (aluviões e aterros) que constituem o recobrimento do túnel no local (ver Fig. 2).

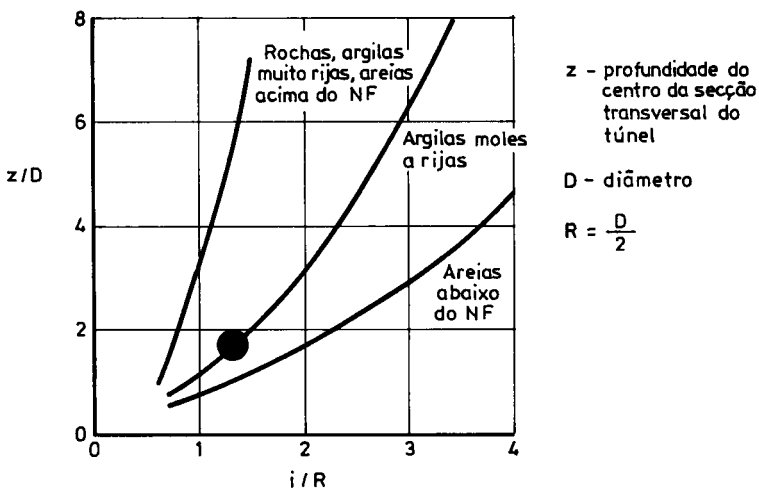


Fig. 11 — Assentamentos superficiais medidos na secção 3, em 85-05-31: relação entre a largura da curva de assentamentos e a profundidade do túnel

6.2 — Deslocamentos verticais a diversas profundidades

Nas Figs. 12, 13 e 14 (respectivamente para as secções 2, 3 e E5) são apresentadas curvas que traduzem a evolução dos assentamentos de pontos situados no eixo vertical de simetria de três secções. Os assentamentos dos pontos situados no interior do maciço foram obtidos somando o assentamento à superfície (medido topograficamente) com o deslocamento vertical relativo entre o ponto do interior do maciço e o ponto superficial correspondente (medido por meio dos varões extensométricos).

É possível verificar que o assentamento máximo dos pontos situados mais perto do coroamento do túnel foi muito grande no caso das secções 2 e E5 (valores da ordem de 60 cm e 30 cm, respectivamente) e pequeno no caso da secção 3 (inferior a 3 cm). Embora não se tenha apresentado a figura correspondente, pode referir-se que no caso da secção E3 o assentamento máximo do ponto mais próximo do coroamento do túnel foi também muito grande (superior a 20 cm).

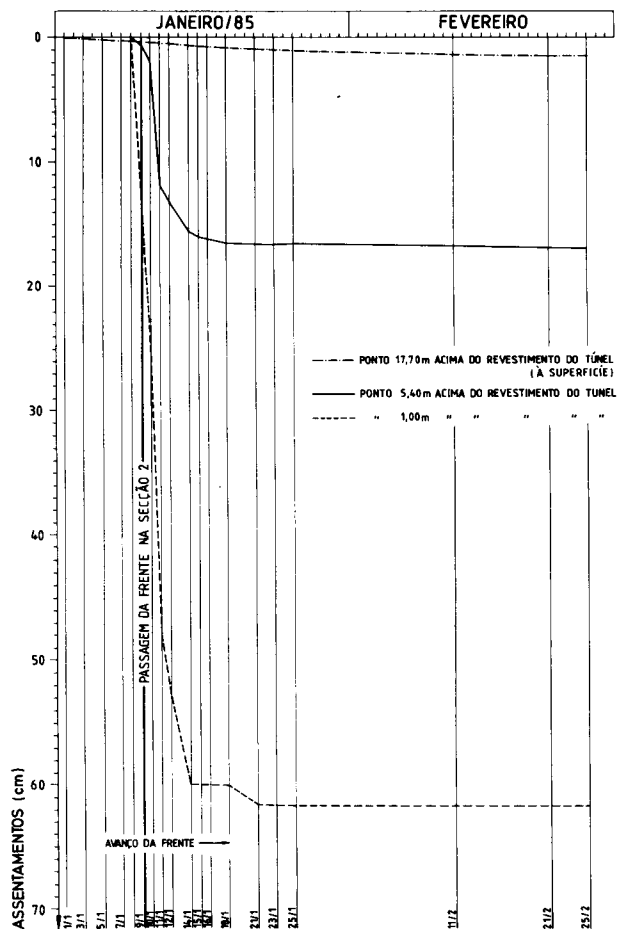


Fig. 12 — Evolução dos assentamentos de três pontos situados no eixo vertical de simetria da secção 2

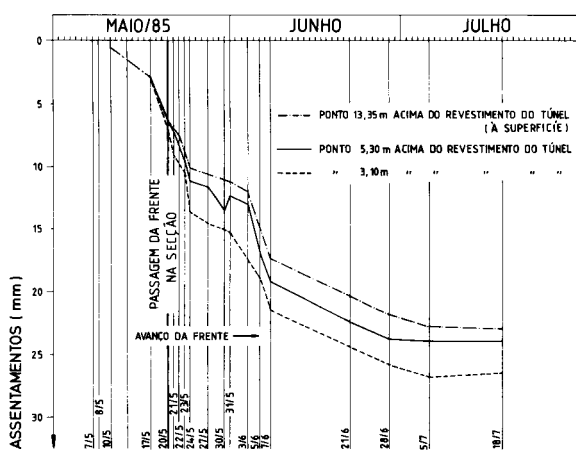


Fig. 13 — Evolução dos assentamentos de três pontos situados no eixo vertical de simetria da secção 3

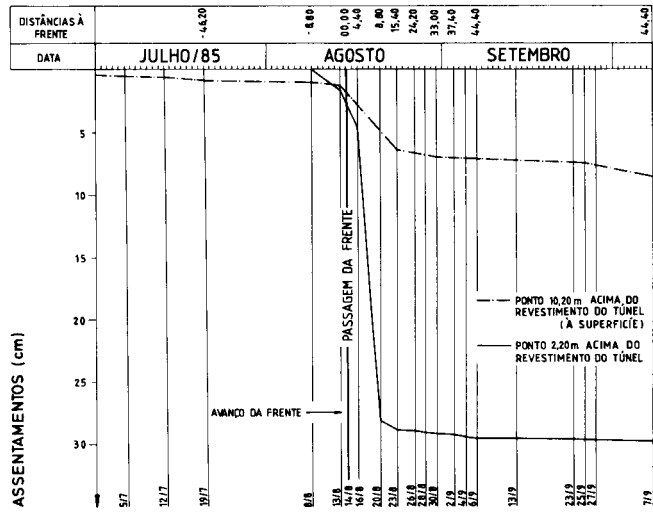


Fig. 14 — Evolução dos assentamentos de dois pontos situados no eixo vertical de simetria da secção E5

O grande contraste existente, no que diz respeito à grandeza dos assentamentos de pontos do interior do maciço, entre as secções 2, E3 e E5, por um lado, e a secção 3, por outro, pode ser justificado com base nas condições geológicas. Com efeito, quer na secção 2 quer na secção E3 a abertura do túnel interessou directamente um estrato de material incoerente (a camada arenosa do complexo das Argilas dos Prazeres) situado abaixo do nível freático, situação que, como é sabido, é particularmente desfavorável, mesmo quando, como foi o caso, se procede à despressurização da água subterrânea. Por outro lado, na secção E5, embora a escavação se tenha efectuado integralmente nas Argilas dos Prazeres, o recobrimento era constituído quase na totalidade pelo complexo aluvionar e aterros. Os grandes assentamentos registados em pontos do interior do maciço devem pois ter resultado, quer directamente (secções E3 e E5), quer indirectamente (através do desenvolvimento de fracturação no estrato argiloso sobrejacente, na secção 2), da perda de material incoerente. Em apoio desta interpretação deve ser referido que a tecnologia construtiva utilizada está inevitavelmente associada a uma descompressão generalizada do contorno da escavação até ao momento da realização da injeção de argamassa de cimento e areia entre o betão do revestimento e o referido contorno.

É de salientar que na secção 2 a abertura do túnel deve ter provocado fracturação e desagregação do maciço numa zona de dimensões muito apreciáveis, já que mesmo o ponto situado 5,40 m acima do revestimento do túnel sofreu um deslocamento máximo da ordem dos 15 cm (ver Fig. 12). No entanto, devido à profundidade do túnel no local (da ordem dos 17 m) e à natureza dos terrenos que constituem o recobrimento (as Areolas da Estefânia têm aí uma espessura de cerca de 10 m), tal fenómeno não teve repercussões à superfície.

Conforme se pode verificar na Fig. 2, na secção 3 a abertura do túnel só interessou formações coesivas rijas, facto que justifica os pequenos deslocamentos medidos nos varões extensométricos aí instalados.

6.3 — Medições inclinométricas

Do conjunto das medições inclinométricas efectuadas apurou-se o seguinte:

- Os deslocamentos horizontais medidos (quer segundo a direcção perpendicular ao eixo do traçado do túnel quer segundo a direcção paralela ao mesmo eixo) são pequenos, sendo o valor máximo da ordem dos 2 cm, no tubo I3 da secção 2. É de salientar no entanto que este valor foi registado numa única medição, efectuada cerca de 6 meses após a frente de escavação ter atingido a secção (existem indícios de que os resultados dessa medição foram influenciados por escavações nas proximidades, destinadas à construção de um posto de ventilação do túnel). Em todas as outras medições o valor máximo medido foi da ordem da dezena de milímetros;

- A partir das datas em que a frente de escavação atingiu as secções, os deslocamentos horizontais processaram-se no sentido do exterior para o interior do túnel;
- Após a passagem da frente pela secção os perfis de deslocamentos horizontais segundo a direcção perpendicular ao eixo do túnel exibem máximos locais na vizinhança da zona do coroamento.

A título de ilustração, são apresentado na Fig. 15 algumas medições inclinométricas realizadas num dos tubos da secção 3.

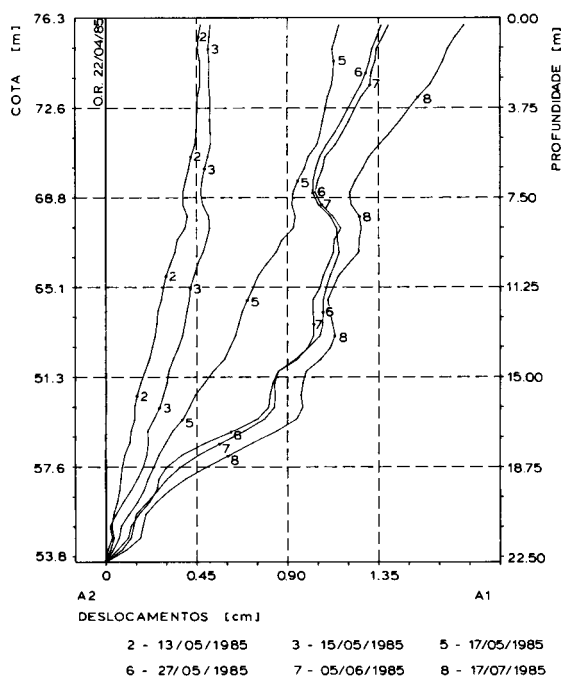


Fig. 15 — Medições inclinométricas na secção 3: perfis de deslocamentos horizontais segundo a direcção perpendicular ao eixo do túnel, em diversas datas

6.4 — Medição de convergências

Devido às características do processo construtivo adoptado, as marcas para medição de convergências só puderam ser colocadas após a betonagem do revestimento definitivo, o qual é de tipo rígido. As convergências medidas foram pois, como se previa, de pequena grandeza. Os deslocamentos relativos entre as marcas foram sempre no sentido de uma aproximação, sendo o valor máximo medido aproximadamente 8 mm, na secção E3, entre as marcas situadas junto às nascenças do arco. De uma forma geral, pode dizer-se que os deslocamentos medidos se processaram simultaneamente com as operações de escavação dos pés-direitos, assistindo-se posteriormente a uma estabilização.

7 — MODELAÇÃO MATEMÁTICA DOS EFEITOS DA CONSTRUÇÃO DO TÚNEL

7.1 — Considerações iniciais

A modelação matemática dos fenómenos físicos associados à construção de túneis em solos é, como se sabe, uma tarefa particularmente difícil. Com efeito, no estabelecimento dos modelos é geralmente necessário ter em consideração aspectos que se revestem de alguma complexidade, como por exemplo: *i)* a natureza essencialmente tridimensional dos fenómenos; *ii)* relações constitutivas não-lineares, inelásticas e dependentes do tempo; *iii)* os múltiplos pormenores relacionados com o processo construtivo.

O recurso a modelos que incorporam estes aspectos levanta dificuldades quer ao nível da definição dos dados do problema (é indispensável uma campanha de caracterização eológica e geotécnica muito completa e um conhecimento pormenorizado das técnicas construtivas), quer ao nível da análise (que facilmente se pode tornar demasiado pesada, em termos de custos).

Tendo em conta, entre outros aspectos, as limitações impostas pelos dados de caracterização geotécnica disponíveis, foram adoptados no presente estudo modelos muito simplificados, baseados nas hipóteses que adiante se discriminarão. Sendo assim, os objectivos da modelação matemática empreendida limitaram-se à obtenção de quadros de referência, não tendo pois existido a pretensão de alcançar uma sobreposição com os resultados da observação.

Foi já referido que, ao contrário do que sucedeu na secção 3, nas secções 2, E3 e E5 os deslocamentos medidos na zona sobrejacente ao coroamento do túnel estão muito provavelmente associados a uma fracturação e desagregação do maciço, pelo que não é possível fazer a sua interpretação quantitativa através de modelos baseados na teoria de deformação de meios contínuos. Por este motivo, foi a secção 3 a escolhida com vista à interpretação, através de modelação matemática, dos resultados obtidos na observação.

Só os resultados experimentais obtidos alguns dias após a passagem da frente pela secção foram objecto de interpretação, pelo que a modelação efectuada diz respeito apenas à escavação da zona da abóbada.

7.2 — Hipóteses de cálculo

A modelação matemática realizada baseou-se nas seguintes hipóteses:

- Existência de um estado plano de deformação na secção em estudo;
- Existência de um eixo vertical de simetria;
- Estado de tensão inicial do maciço caracterizado pela inexistência de tensões tangenciais em planos horizontais ou verticais, sendo a tensão segundo a direcção vertical (σ_{v0}) e a tensão segundo a direcção horizontal (σ_{h0}) dadas por:

$$\sigma_{v0} = \gamma z \quad ; \quad \sigma_{h0} = K_0 \sigma_{v0}$$

onde γ é o peso volúmico médio do material sobrejacente (adoptou-se $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$), z é a profundidade e K_0 é o coeficiente de impulso em repouso, considerado uniforme;

- A definição geométrica dos materiais interessados pela abertura do túnel é a que se representa no lado esquerdo da Fig. 16. Considerou-se que todos os materiais

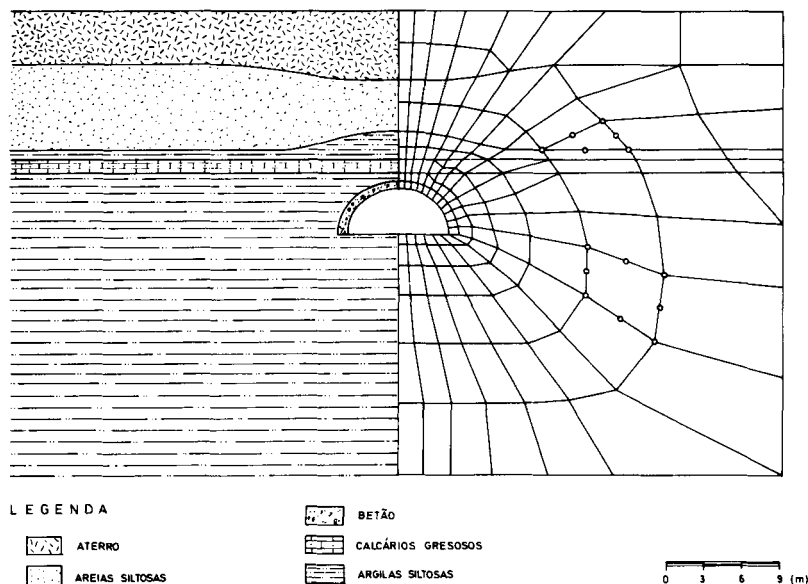


Fig. 16 — Materiais interessados e malha de elementos finitos

têm comportamento elástico, linear, isotrópico e independente do tempo, caracterizado pelos seguintes parâmetros:

Aterro	—	Módulo de Young $E=10$ MPa	
		Coefficiente de Poisson $\nu=0,25$	
Areias	—	$E=40$ MPa	$\nu=0,25$
Argilas (camada superior)	—	$E=80$ MPa	$\nu=0,25$
Argilas (camada inferior)	—	$E=100$ MPa	$\nu=0,25$
Calcários	—	$E=300$ MPa	$\nu=0,25$
Betão do revestimento	—	$E=15$ GPa	$\nu=0,20$

Os valores atribuídos aos parâmetros de deformabilidade dos terrenos ou se basearam nos resultados dos ensaios realizados ou, quando isso não foi possível, foram estimados tendo em conta a natureza das formações.

7.3 — Situações analisadas

Com a hipótese de existência de um estado plano de deformação é obviamente impossível simular as diversas fases de um processo construtivo essencialmente tridimensional. Como tal, optou-se por analisar apenas duas situações extremas, a saber:

- Escavação sem a intervenção de qualquer suporte;
- Existência prévia do revestimento definitivo de betão, caso em que as solicitações resultantes do alívio de tensões se consideraram aplicadas no contacto (suposto rugoso) entre o revestimento e o contorno da escavação.

7.4 — Método de análise

A análise dos modelos correspondentes a cada uma das duas situações referidas foi efectuada por via numérica, recorrendo ao método dos elementos finitos. A malha utilizada está representada na Fig. 16; na situação de inexistência de revestimento a análise foi efectuada adoptando para o betão um módulo de Young próximo de zero.

Os cálculos foram efectuados por intermédio de um programa de cálculo automático desenvolvido no Departamento de Geotecnia do LNEC. Este programa permite a utilização de diversos tipos de elementos finitos, incluindo o elemento triangular de seis nós e o elemento quadrangular de oito nós.

7.5 — Resultados obtidos

Nas Figs. 17, 18 e 19 estão representados os resultados numéricos mais significativos. A fim de facilitar as comparações estão também representados, nas mesmas figuras, os resultados das observações.

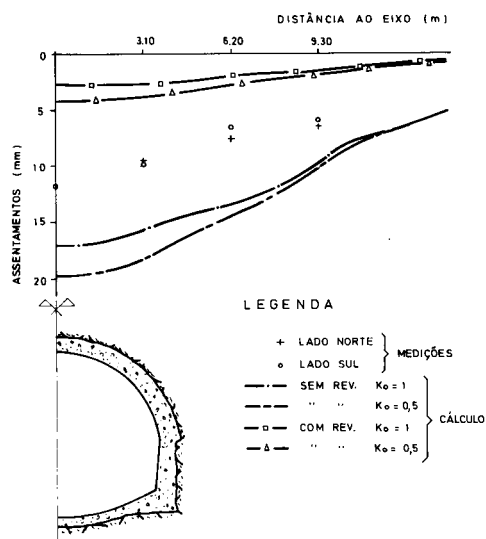


Fig. 17 — Comparação entre deslocamentos medidos e calculados: assentamentos superficiais

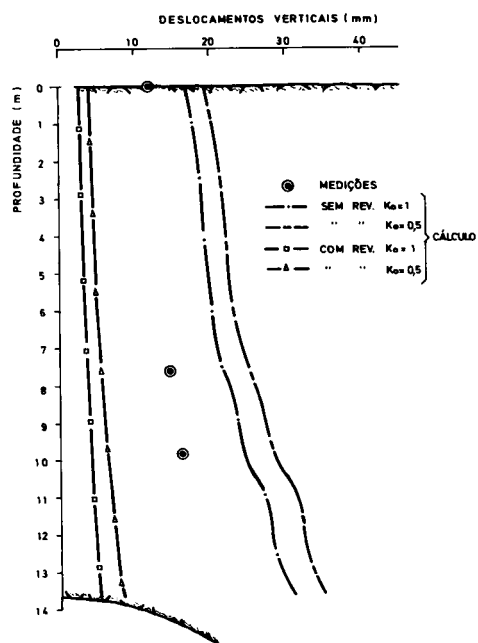


Fig. 18 — Comparação entre deslocamentos medidos e calculados: assentamentos no eixo de simetria

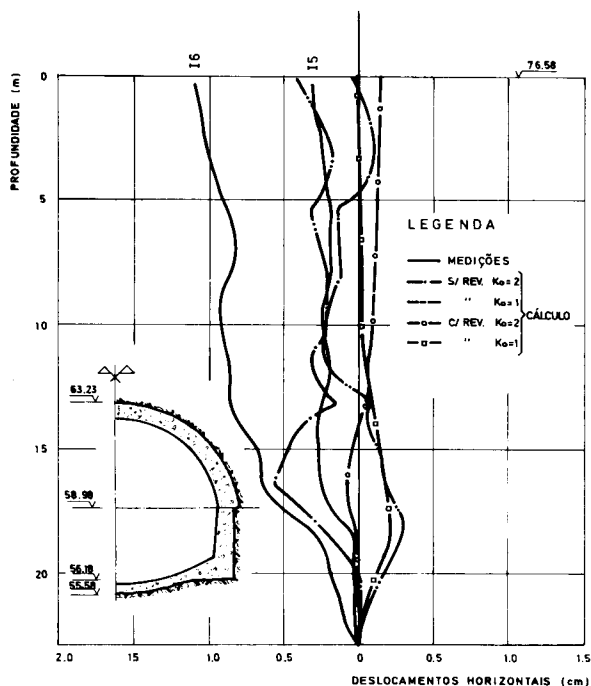


Fig. 19 — Comparação entre deslocamentos medidos e calculados:
deslocamentos horizontais dos tubos inclinométricos

As Figs. 17 e 18 referem-se aos assentamentos do maciço, à superfície e no eixo vertical de simetria, respectivamente. Estão representados quer os assentamentos medidos quer as curvas de assentamentos calculados. Estas, em número de quatro, dizem respeito às duas situações analisadas (com e sem revestimento) e, para cada uma delas, a dois valores de K_0 (0,5 e 1,0). É possível verificar que: *i*) existe, como seria de esperar, uma diferença significativa entre os resultados numéricos correspondentes às duas situações referidas; *ii*) os resultados numéricos são pouco sensíveis às variações de K_0 ; *iii*) os resultados das observações ficam enquadrados, de forma aceitável, no conjunto dos resultados numéricos.

A Fig. 19 refere-se aos deslocamentos horizontais do maciço, no plano da secção, ao longo dos tubos inclinométricos. Estão representadas quer as curvas de deslocamentos medidos quer as curvas de deslocamentos calculados. Estas, em número de quatro, dizem respeito às duas situações analisadas (com e sem revestimento) e a dois valores de

K_0 (1,0 e 2,0). É de referir que, com a finalidade de possibilitar a comparação entre resultados experimentais e numéricos, estes últimos dizem respeito, na Fig. 19, a deslocamentos relativos tomando como base de referência o fundo dos tubos inclinométricos.

A análise da Fig. 19 permite verificar o seguinte: i) os deslocamentos horizontais calculados são mais sensíveis às variações de K_0 do que os deslocamentos verticais; ii) a concordância entre deslocamentos horizontais medidos e calculados não é tão satisfatória como a que existe no caso dos deslocamentos verticais, mas deve ser salientado, a este propósito, que a margem de erro associada às medições de deslocamentos horizontais é sem dúvida superior.

8 — CONCLUSÕES

Os resultados apresentados no presente trabalho ilustram o interesse de que se reveste a observação do comportamento de obras subterrâneas (nomeadamente de túneis em solos) como forma de avaliação da segurança durante a fase construtiva e de aferição das hipóteses que estão na base da elaboração do projecto.

O aspecto mais relevante das observações efectuadas foi a medição, em algumas secções, de grandes assentamentos (da ordem das dezenas de centímetros) de pontos do interior do maciço, na vizinhança do coroamento do túnel. Tais assentamentos, que numa das secções se verificaram mesmo a uma distância apreciável do coroamento, estão muito provavelmente associados à perda de material incoerente, pelo que a sua previsão por via matemática teria sido praticamente impossível.

A finalizar é de salientar que, não obstante o carácter muito simplificado dos modelos utilizados, foi possível enquadrar satisfatoriamente os resultados das observações numa das secções no conjunto dos resultados obtidos, para a mesma secção, por meio de modelação numérica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CORREIA, R. M. (1987) — *Observação do túnel do Metropolitano no troço Cidade Universitária - Entre Campos*, Relatório do LNEC.
- METROPOLITANO DE LISBOA (1983) — *Projecto do 45.º troço (C. Universitária - E. Campos)*, Direcção de Projectos e Obras.
- PECK, R. (1969) — *Deep excavations and tunneling in soft ground*. 7.ª Conferência Internacional de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, México, State of the Art Vol., pp. 225-290.