

**PROLONGAMENTO DA LINHA AMARELA DO METROPOLITANO
DE LISBOA CAMPO GRANDE A ODIVELAS.
ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES PRODUZIDAS NA ESCAVAÇÃO
DO TÚNEL POR TBM/EPB.**

***THE LISBON METRO YELLOW LINE EXTENSION FROM
CAMPO GRANDE TO ODIVELAS.
THE ANALYSIS OF GROUND MOVEMENTS DUE TO BORED
TUNNELLING (TBM/EPB).***

MELÂNEO, FREDERICO (*)
JORGE, CARLA (**)

RESUMO

Nesta comunicação apresenta-se uma breve descrição do túnel do prolongamento da Linha Amarela do Metropolitano de Lisboa, executado por escudo pressurizado (TBM/EPB). Descrevem-se os modelos realizados no sentido da previsão de assentamentos, da avaliação do risco de danos sobre as estruturas e as soluções desenvolvidas no projecto. Comparam-se ainda as deformações observadas em obra com as resultantes dos modelos empíricos estimadas no projecto.

ABSTRACT

This communication presents a brief description of earth pressure shield tunnel from the Yellow Line Extension of the Metropolitano de Lisboa. The models used in the design for the evaluation of risk of damage to building due to subsidence are described. Finally, a comparison between the monitoring deformation results due to bored tunnelling and the deformation estimated in the design by empirical models is presented.

(*) *Eng.º Civil; FERCONSULT, SA, Director Técnico, frederico.melaneo@ferconsult.pt;
ISEL, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa*

(**) *Eng.ª Geóloga (FCT - UNL); FERCONSULT, SA; carla.jorge@ferconsult.pt*

1. INTRODUÇÃO

A construção de túneis superficiais e/ou em terrenos de fraca qualidade geotécnica é, inevitavelmente, causa de movimentos à superfície que, em áreas urbanas ocupadas, podem ser fonte de desordens que afectam os edifícios e os inúmeros serviços instalados no subsolo – redes de águas, esgotos, gás, electricidade e comunicações.

Situação como a descrita encontra-se no traçado do Prolongamento da Linha Amarela do Metropolitano de Lisboa (ML), entre o Campo Grande e Odivelas [1], cujos túneis escavados em zona urbana construída, exigiram que, em projecto, se tivesse de estimar os movimentos produzidos e efectuar a avaliação dos riscos de danos associados. Permitiu, ainda, dar indicações para a tomada de decisão sobre as soluções ou caminhos a seguir no sentido de os mitigar [2]. Também, durante a obra, houve que aferir o modelo de análise usado com os dados obtidos da observação.

A presente comunicação pretende confrontar resultados dos modelos simplificados então usados no projecto com os dados obtidos da observação do comportamento da escavação dos túneis, entretanto terminada.

2. BREVE DESCRIÇÃO DA OBRA

O trecho da linha em causa, entre Odivelas e o Campo Grande, possui a extensão de cerca de 5 km, dos quais 3,5 km em túnel, sendo 2,7 km foram construídos com recurso a um escudo de pressão de terras de fabrico LOVAT (Fig. 1) com as seguintes características:

modelo: ME 386 SE

dimensões:

roda de corte:	9,834 m
diâmetro interno:	9,809 m
diâmetro do escudo:	9,796 m
comprimento geral:	10,07 m
diâmetro interno das aduelas:	8,800 m
diâmetro externo das aduelas:	9,520 m
comprimento das aduelas:	1,20 m

O troço construído por este escudo situa-se entre o Poço de Ataque, junto à Calçada de Carriche, e o Campo Grande, tendo as obras sido iniciadas no final do ano de 1 999 com a construção do Poço de Ataque (para acesso do escudo) e início da escavação do túnel, e concluído em Setembro de 2 001 com a chegada do escudo ao Poço de Extracção (Fig. 2).

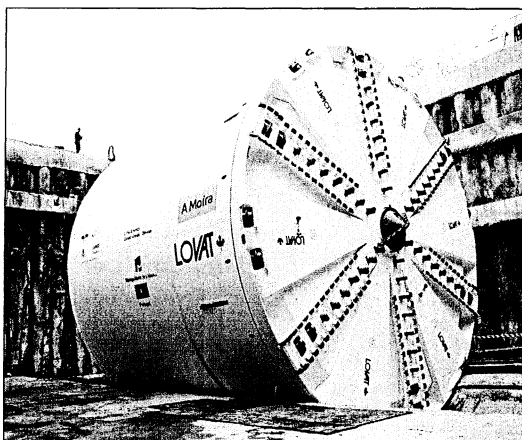


Figura 1 - Escudo LOVAT usado na escavação (montagem no Poço de Ataque).

Ao longo do traçado em zona urbana, identificaram-se várias situações da passagem do escudo nas proximidades ou sob os edifícios e que se caracterizaram de interferência, de que se descrevem as mais significativas no Quadro 1.

3. METODOLOGIA DO PROJECTO

Em projecto, a avaliação das interferências e a definição de medidas mitigadoras seguiu três etapas:

- identificação das estruturas susceptíveis de serem afectadas pelos movimentos dos terrenos, definição dos cenários de risco;
- previsão dos assentamentos produzidos e dos limites da influência da escavação;
- avaliação dos danos induzidos nessas estruturas ou nos seus componentes e definição das medidas preventivas e/ou correctivas.

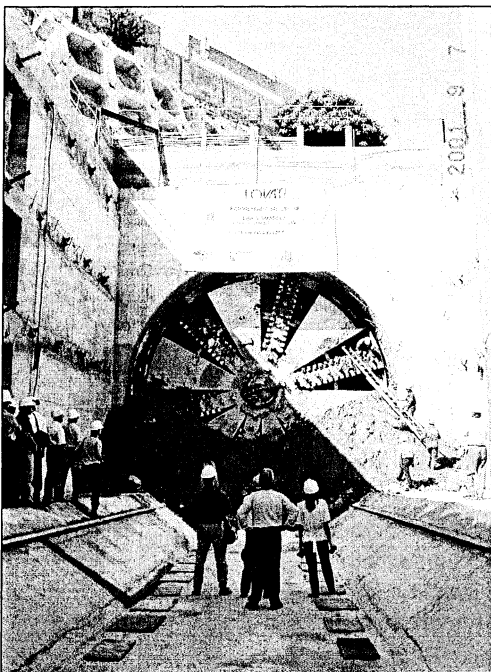


Figura 2 – Chegada do escudo ao Poço de Extração (Campo Grande).

A análise da ocupação ao longo do traçado identificou vários edifícios que estão nas condições enunciadas (Quadro 1).

Os limites do corredor afectado pela construção/escavação do túnel foram definidos pela aplicação das formulações empíricas estabelecidas para cenários de constituição e resposta dos terrenos atravessados [2], e os edifícios foram classificadas quanto à sua solução estrutural, tipo de fundação (sensibilidade a assentamentos) e altura acima do solo, tendo-se ainda considerado a posição relativa do túnel a essas estruturas (Quadro 1).

Considerou-se *túnel superficial* ou *profundo* quando os recobrimentos sobre a abóbada da escavação são inferiores ou superiores a dois diâmetros do túnel (~ 20m); e *túnel próximo* ou *muito próximo* quando a estrutura objecto de análise se encontra a uma distância, na horizontal, fora ou dentro do limite de 1,5 diâmetro do túnel (~ 15m).

Na ponderação dos riscos utilizou-se a classificação proposta por *Boscardin e Cording* [3], que se baseia na abertura de fendas como forma de classificar os danos produzidos nas estruturas, comparando-se com a classificação proposta pela *AFTES* [4].

No Quadro 2, apresenta-se o resumo dos riscos de danos previsíveis e as medidas adoptadas em projecto para a sua minoração ou de correcção.

A previsão dos assentamentos (1), dos movimentos horizontais (2) e a sua distribuição transversal ao eixo do túnel baseou-se na curva gaussiana adoptada por *Peck* [5], (Fig. 3) e definida por:

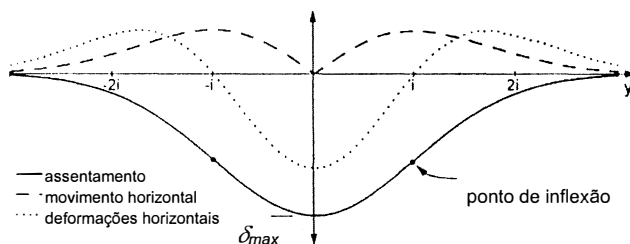


Figura 3 – Curva de assentamentos.

$$\delta_y = \delta_{max} \exp \left[\frac{-y^2}{2i^2} \right] \quad (1)$$

$$u_y = - \delta_y \left[\frac{y}{H} \right] \quad (2)$$

- δ_y assentamentos;
- δ_{max} assentamento máximo (na vertical do eixo do túnel);
- y distância horizontal ao eixo vertical do túnel;
- i distância horizontal do eixo vertical do túnel ao ponto de inflexão da curva dos assentamentos;
- u_y movimento horizontal;
- H profundidade do eixo horizontal do túnel.

Para cada interferência foram calculadas as curvas correspondentes ao assentamento transversal produzido à superfície pela escavação do túnel, tendo-se considerado duas curvas representativas, a que produz o máximo valor do assentamento (envolvente superior), e a que produz para o assentamento máximo o valor mais próximo do valor médio de todas as curvas calculadas com excepção da de valor máximo (envolvente inferior), que se resumem no Quadro 3.

Para as interferências com grau elevado de risco, (2.2, 3 e 4), privilegiou-se o tratamento prévio dos terrenos envolventes ao túnel pela injeção de caldas de cimento na constituição de colunas de *jet grouting*, (Fig. 5) por o traçado do túnel se encontrar algo afastado das edificações e pela envolvente geométrica da execução só permitir o tratamento localizado.

Para a interferência 1.2, adoptou-se uma intervenção preventiva no talude das instalações da RTP, com a instalação de ancoragens adicionais enviesadas com selagem fora da influência da escavação do túnel.

Para as outras interferências adoptou-se uma intervenção correctiva, com actuações locais *à posteriori*, de reparações de fissuras abertas, dos rebocos e das pinturas.

Quadro 1 – Identificação de interferências na passagem do escudo, tipificação e condições geológico e geotécnicas

INTERFERÊNCIA		CARACTERIZAÇÃO		CONDIÇÕES GEOLÓGICO E GEOTÉCNICAS	
N.º	LOCAL	DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA	PASSAGEM DO ESCUDO	COMPLEXOS	CLASSE
1	1.1 R. Embaixador Martins Janeira, 9 e adjacentes.	Conjunto em banda de edifícios de nove pisos acima do solo, quatro caves, fundações directas, estrutura de betão armado.	Superficial. Próximo do traçado.	C1 - aterros arenosos por vezes argilosos.	fraca qualidade
	1.2 Talude Norte das instalações da RTP	Talude vertical com cerca de 11 m de altura, presentemente reforçado com ancoragens.	Profunda. Perpendicular ao talude e edifícios da RTP.	C4 – “ <i>areias da Quinta do Bacalhau</i> ” – areias geralmente finas a médias com alguns finos.	razoável qualidade
2	2.1 Edifício McCann	Edifício de quatro pisos elevados e duas caves, estrutura de betão armado e fundação directa.	Superficial. Próximo do traçado.	C1 - aterros arenosos por vezes argilosos.	fraca qualidade
	2.2 Edifício da Hemodiálise	Edifício de um piso elevado e cinco caves, estrutura de betão armado e fundação directa.	Superficial Muito próximo do traçado.	C1 - aterros arenosos por vezes argilosos.	fraca qualidade
3	Edifícios da Av. Maria Helena Vieira da Silva	Edifícios de onze pisos elevados e três caves, estrutura de betão armado, fundação directa.	Superficial. Muito próximo do traçado.	C4 – “ <i>Areias da Quinta do Bacalhau</i> ” – areias geralmente finas a médias com alguns finos.	razoável qualidade
4	R. Luís Pastor Macedo, Lote 23 e adjacentes	Edifícios em banda com sete pisos elevados e uma cave, estrutura de betão armado e fundação directa.	Superficial. Muito próximo do traçado.	C2A – depósitos aluvionares/solos finos.	fraca qualidade
5	R. Leopoldo de Almeida, 13	Edifício de catorze pisos, três caves, estrutura de betão armado e fundações directas.	Superficial. Próximo do traçado.	C2B – areias grossas com areão e seixos rolados e cascalheira de base.	fraca qualidade
6	Estrada da Torre, 47 A	Edifícios de pequena dimensão em planta, de dois pisos elevados, estrutura de alvenaria e pavilhão oficina de estrutura metálica, fundações directas.	Média profundidade. Sobre o traçado.	C5 – “ <i>Argilas do Forno do Tijolo</i> ” – argilas siltosas e siltes argilosos com intercalações de areias, de calcários coníferos e margas.	boa qualidade
7	R. Jorge de Sena (Edifício Sta. Clara)	Edifício de grande porte com estrutura de betão armado.	Profunda. Próximo do traçado.	C5 e C6 – “ <i>Calcários de Entrecampos</i> ”, sobrejacentes ao túnel.	razoável qualidade
8	Escola Primária/Ameixoeira	Edifício de dois pisos, sem caves, com estrutura de betão armado.	Profunda. Sobre o traçado.	C5 e C6 – “ <i>Calcários de Entrecampos</i> ”, sobrejacentes ao túnel	razoável qualidade
9	Urbanização Paço da Ameixoeira	Edifício de três pisos, com estrutura de betão armado e fundações directas.	Profunda. Sobre o traçado.	C10 – “ <i>Formação de Benfica</i> ”, margas e arenitos em regra conglomeráticos argilo - margosos.	boa qualidade
10	R. Prof. Barahona Fernandes, 1 e 2	Edifícios moradias em banda com dois pisos e estrutura de betão armado, fundações directas.	Profunda. Sobre o traçado.	C10 – “ <i>Formação de Benfica</i> ”, margas e arenitos em regra conglomeráticos argilo - margosos.	boa qualidade.

Quadro 2 – Previsão de danos e medidas adoptadas em projecto

Nº	LOCAL / REFERÊNCIA	CATEGORIA DE DANOS	DESCRIÇÃO DA PREVISÃO DE DANOS	MEDIDAS ADOPTADAS
1	1.1 Rua Embaixador Martins Janeira, 9 e adjacentes.	0	Assentamento e eventuais microfissuras nas paredes, não detectáveis à vista desarmada.	Reparação dos danos. Programa de observação particular com instalação de equipamento.
	1.2 Talude Norte das instalações da RTP	--	Deformação e eventual descompressão do maciço. Queda de blocos das intercalações rochosas. (1)	Ancoragens e estruturas de reforço. Programa de observação particular com instalação de equipamento.
2	2.1 Edifício McCann	0	Assentamento e eventuais microfissuras nas paredes, não detectáveis à vista desarmada.	Reparação dos danos. Programa de observação particular com instalação de equipamento.
	2.2 Edifício da Hemodiálise	1 – 2	Assentamento e fissuras nas paredes. Algumas deformações estruturais. Atrito nas portas e janelas	Reforço do terreno envolvente ao túnel. Programa de observação particular com instalação de equipamento.
3	Edifícios da Av. Maria H. Vieira da Silva	1 – 3	Assentamento e fissuras nas paredes. Algumas deformações estruturais. Atrito nas portas e janelas. Problemas com canalizações.	
4	Rua Luís Pastor Macedo, Lote 23 e adjacentes	1 – 2	Assentamento e fissuras nas paredes. Algumas deformações estruturais.	
5	Rua Leopoldo de Almeida, 13	0 – 1	Assentamento e eventuais fissuras nas paredes.	Reparação dos danos. Programa de observação particular com instalação de equipamento.
6	Estrada da Torre, 47 A	2 – 3	Assentamento e fissuras nas paredes. Algumas deformações estruturais. Prováveis roturas de canalizações. (2)	
7	Rua Jorge de Sena (Edifício Sta. Clara)	0	Assentamento e eventuais microfissuras nas paredes, não detectáveis à vista desarmada	
8	Escola Primária	0 – 1	Assentamento e eventuais fissuras nas paredes.	
9	Urbanização Paço da Ameixoeira	0	Assentamento e eventuais microfissuras nas paredes, não detectáveis à vista desarmada	
10	Rua Prof. Barahona Fernandes, 1 e 2	0 – 3	Assentamento e eventuais fissuras nas paredes. (3)	

(1) Previsão efectuada face à análise das condições geológico geotécnicas das formações ocorrentes em superfície e do comportamento dos taludes em áreas adjacentes;

(2) Estrutura metálica de um pavilhão para a qual a classificação não é aplicável;

(3) Não tem em consideração o pré-tratamento efectuado no túnel piloto existente na empreitada do poço de ataque.

Quadro 3 – Valores adoptados na análise do risco de danos e observados na obra

Nº	INTERFERÊNCIAS		δ_r (mm)			U_r (mm)			ΔV (%)			i (m)			B (m)			H (m)	K	Notas
	LOCAL	Secções	max	min	obs	max	min	obs	max	min	obs	max	min	(4)	max	min	(4)			
1	1.1 Rua Embaixador Martins Janeira, 9 e adjacentes	S111	79	23	11,5	20	6	-	0,83	<i>0,50</i>		3,3	6,8	-	16,5	33,9	-	16,0	-	-
2	2.1 Edifício McCann	S107	63	24	59,3	17	8	-	1,62	0,74	1,22	8,1	9,7	6,2	40,4	48,5	24,0	20,0	0,31	(1)
	2.2 Edifício Hemodialise	S105	55	25	15	14	8	-	1,57	0,93	0,29	9,0	11,5	5,8	45,1	57,7	22,3	21,0	0,28	Zona tratada com Jet grouting
3	Edifícios da Av. Maria H. Vieira da Silva	S98	64	24	4,0	17	8	-	1,63	0,73	0,07	8,0	9,6	5,4	40,0	47,8	25,4	18,0	0,30	
4	Rua Luís Pastor Macedo, Lote 23 e adjacentes	S85	37	24	0,6	11	16	-	0,73	0,36	-	6,2	4,7	-	30,8	36,0	-	13,0	-	
5	Rua Leopoldo de Almeida, 13	S62	37	15	1,5	10	4	-	0,99	0,38	-	8,4	8,0	-	42,1	39,9	-	19,2	-	(2)
6	Estrada da Torre, 47 A	S50	41	18	<i>(1,3)</i>	9	5	-	0,98	0,49	-	7,5	8,7	-	37,5	43,5	-	20,0	-	(3)
7	Rua Jorge de Sena (Edifício Sta. Clara)	S32	19	13	3,0	5	3	-	0,70	0,51	0,08	11,4	12,6	8,0	57,0	63,0	30,3	28,0	0,29	-
8	Escola Primária/Ameixoeira	S23	20	5	2,3	3	1	-	0,45	0,20	-	7,2	11,7	-	58,6	36,0	-	29,0	-	-
9	Urbanização Paço da Ameixoeira	S6	11	4	1,5	2	1	-	0,37	0,19	-	10,4	15,0	-	51,8	75,0	-	29,0	-	(5)
10	Rua Prof. Barahona Fernandes, 1 e 2	S3	45	9	1,5	6	2	-	0,65	0,24	-	4,5	8,7	-	22,5	43,5	-	20,0	-	(6)

ΔV perda de volume por metro (%);

B largura da banda afectada pelos assentamentos e centrada no eixo do túnel (observada).

obs. valores obtidos da observação do comportamento da obra

H recobrimento de terreno ao eixo do túnel

$K = i/H$; $i = Vol/(2,5 \delta_{max})$

(1) Número de pontos insuficiente

(2) Assentamento medido junto ao edifício (régua)

(3) δ_{max} = empolamento

(4) Valores calculados

(5) Pontos de leitura afastados

(6) Secção sob a influência do poço de ataque

4. OBSERVAÇÃO DA OBRA

Para o acompanhamento da obra estabeleceu-se um programa de observação particular para cada interferência que constou da instalação no terreno de marcas de observação superficial em secções transversais ao eixo do túnel, de inclinómetros e extensómetros, como exemplificado na Figura 4 para a interferência 2. Nos edifícios foram aplicados alvos topográficos e régua de observação.

O avanço da escavação do túnel foi acompanhada diariamente por leitura do equipamento instalado, procurando-se despistar situações anómalas e validar o método usado na prevenção dos riscos de danos.

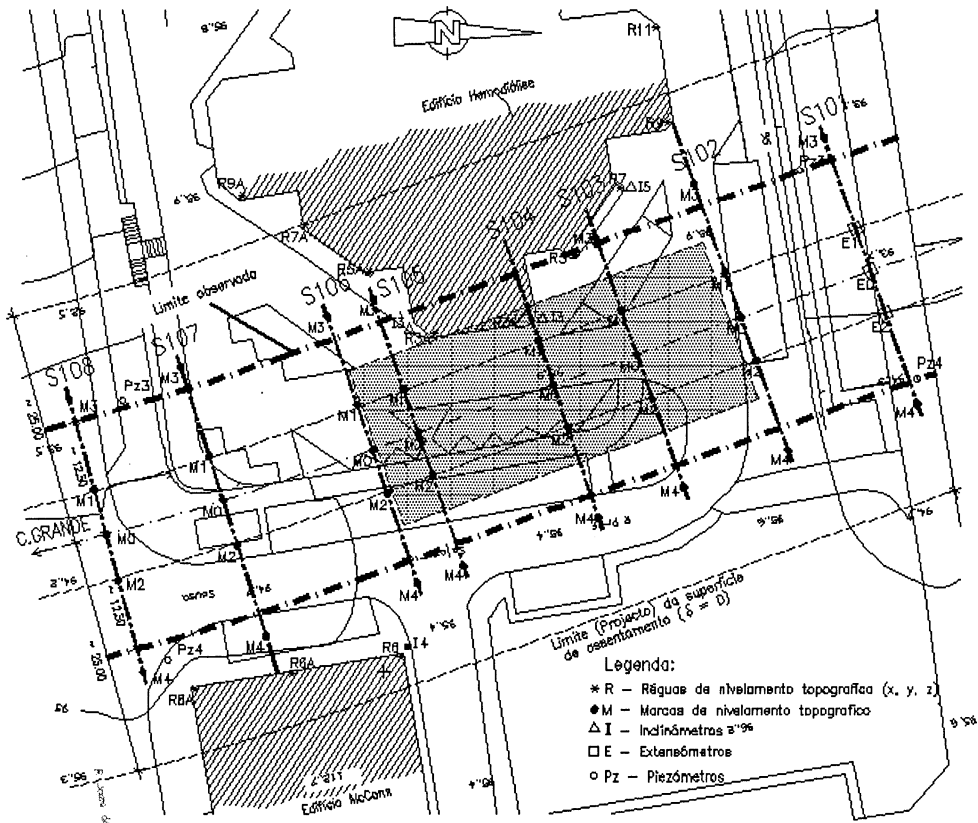


Figura 4 - Interferência 2. Secções instrumentadas.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS OBTIDOS

Com os resultados obtidos da observação, compararam-se com os da modelação do projecto, assentamentos e volumes de terreno perdidos, de forma a verificar se o nível dos movimentos do terreno não ultrapassavam os tomados como referência na avaliação dos danos.

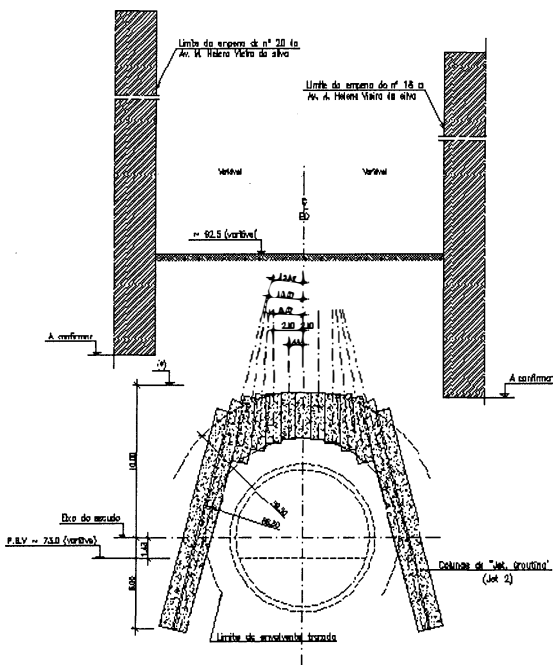


Figura 5 – Esquema duma secção tratada com colunas de jet grouting.

Para as secções para as quais a avaliação de riscos determinou danos ligeiros, sem tratamentos especiais, estabeleceram-se as curvas de assentamentos de projecto e a obtida por análise dos dados da observação (Fig. 6).

Para as zonas em que se considerou necessário efectuar o reforço da envolvente da escavação para limitação da perda do volume de terras, consideraram-se secções adicionais de observação a montante da interferência, para validação atempada da modelação de projecto e compararam-se com os valores das secções tratadas (Figs. 7 e 8).

Verifica-se, Figura 6, que todos os assentamentos medidos são inferiores aos de projecto, evidenciando nível baixo de danos, o que efectivamente se veio a confirmar.

Também, os limites do corredor afecto aos movimentos se encontram, na realidade, mais próximos do eixo do túnel, definindo um corredor mais estreito que o de projecto (Quadro 3). E, como era de esperar, a escavação de túneis em aterros, mesmo com a utilização de escudo pressurizado, produziu assentamentos de valor significativo.

Na Figura 7, representa as zonas não tratadas de referência, e, à semelhança do caso anterior, obtiveram-se assentamentos inferiores aos previstos no projecto, bem como a redução da largura do corredor de perturbação (Quadro 3).

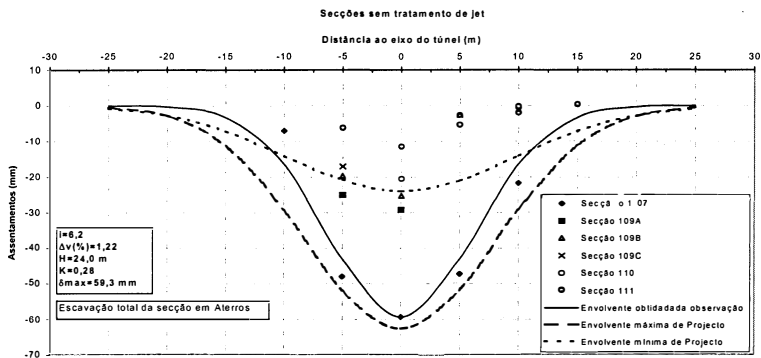


Figura 6 – Gráfico da subsidência nas secções não tratadas.

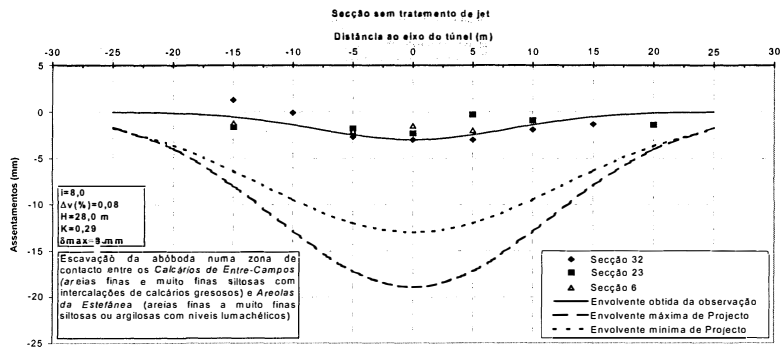


Figura 7 – Gráfico da subsidência nas secções de referência não tratadas.

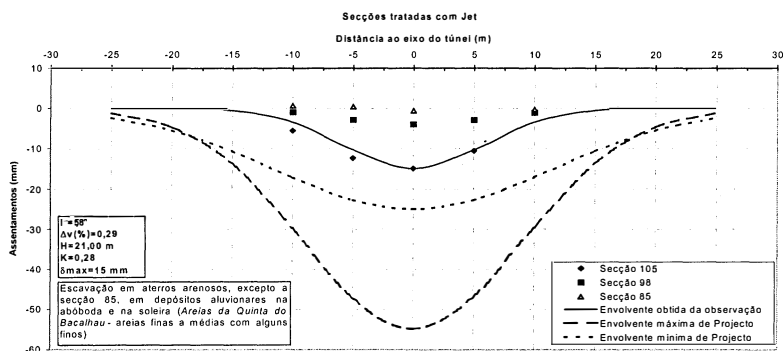


Figura 8 – Gráfico da subsidência nas secções tratadas.

A Figura 8 mostra as curvas de assentamento em zonas tratadas, em que os valores dos assentamentos máximos observados são de valor significativamente inferior aos assumidos no projecto (terreno não tratado – Quadro 3), evidenciando nível de danos baixos ou nulos, o que efectivamente veio a ocorrer.

O tratamento da informação recolhida mostrou que a perda de volume de terreno se situa em percentagens máximas da ordem de 0,08% (secção da frente 75,95 m²), valores inferiores aos tomados no projecto, aproximando-se dos valores usualmente tomados como referência só na zona em que se atravessaram materiais de aterro.

Verifica-se, também, que a correlação $i = k H$, proposta por *O' Reilly e New (1982)* [6], para a definição do ponto de inflexão (i) da curva de assentamento em função da profundidade do eixo do túnel (H) e das características geotécnicas dos materiais escavados, traduzida pelo coeficiente (K), toma valores inferiores a 0,3 (solos granulares).

A largura do corredor de perturbação situa-se em cerca de metade do valor adoptado no projecto, portanto, limitando a zona interferida e, consequentemente o número de estruturas

6. CONCLUSÕES

Os modelos simplificados do comportamento da escavação permitiram delimitar a envolvente superior do contorno das zona afectadas pelos assentamentos, avaliar o grau do risco de danos induzidos nas construções, e ainda, definir uma estratégia de medidas a empreender para os minorar, quer com reparações “*a posteriori*”, quer com acções preventivas de reforço.

Verifica-se que este modelos evidenciam maior flexibilidade, traduzida em maior nível de deformação do terreno, induzindo estratégias conservadoras na mitigação dos riscos. Também, se confirma que os corredores afectos aos assentamentos possuem largura inferior às determinadas pelos modelos descritos pela curva gaussiana.

Salienta-se a importância do papel dos programas de observação das obras para, atempadamente, fornecerem a informação do comportamento da escavação nas diversas zonas de forma a se poder validar o modelo de comportamento seguido no projecto.

AGRADECIMENTO

Os autores agradecem ao Metropolitano de Lisboa a autorização concedida para a utilização de referências e de dados do projecto e da obra contidos na presente comunicação.

REFERÊNCIAS

- [1] Metropolitano de Lisboa (1999). *Prolongamento da Linha Amarela do Campo Grande a Odivelas – Projecto de Execução*;
- [2] Melâneo, F. (2000). *Prolongamento da Linha Amarela do ML Campo Grande – Odivelas. Interferências à Superfície. Avaliação de Riscos e Danos. Soluções Propostas*. Congresso Nacional de Geotecnia, Porto, pp. 927-939;
- [3] Boscardin, M. D.; Cording, E. G. (1989), *Building Response to Excavation Induced Settlement*, ASCE, Journal of Geotechnical Engineering, Vol 115, n.º1, pp.1-21;
- [4] *AFTES* (1995). *Recommandations Relatives aux Tassements Liés au Creusement des Ouvrages en Souterrain* ;
- [5] Peck, R.B (1969). *Deep excavation and tunnelling in soft ground*. Proc.7th ICSMFE, Mexico City, pp.225-290;
- [6] O'Reilly, M.P. & New, B.M.(1982). *Settlements above tunnels in the United-Kingdom their magnitude and prediction*. Tunnelling'82, London, pp.173-181.