

ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL DA ESTAÇÃO FARIA GUIMARÃES

STRUCTURAL BEHAVIOUR ANALYSIS OF FARIA GUIMARÃES STATION

Ferreira, Paulo, Metro do Porto, Porto, Portugal, *paulo.ferreira@metro-porto.pt*
Miranda, Tiago, Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, *tmiranda@civil.uminho.pt*
Gomes Correia, A., Universidade do Minho, Guimarães, Portugal, *agc@civil.uminho.pt*
Salgado, Pedro Almeida, FEUP, Porto, Portugal, *ec03026@fe.up.pt*
Fernandes, Tiago Almeida, FEUP, Porto, Portugal, *ec03028@fe.up.pt*
Sousa, L. Ribeiro, FEUP, Porto, Portugal, *lsousa@fe.up.pt*

RESUMO

No presente estudo efectua-se a modelação e análise do comportamento estrutural da estação Faria Guimarães, do Metro do Porto. A estação é constituída por um cruzamento oblíquo de duas grandes galerias executadas através do método SEM/NATM. A obra é de elevada complexidade devido aos condicionamentos geométricos da estação e obras adjacentes, à grande heterogeneidade do maciço e à ocupação intensa da superfície. A análise do comportamento estrutural da estação foi realizada recorrendo a modelos numéricos 2D e 3D, bem como a resultados obtidos com a observação da estação.

ABSTRACT

In present paper the modelling and structural behaviour analysis of the Faria Guimarães station, of Metro do Porto, is presented. The station includes the inclined intersection of two large galleries executed through SEM/NATM method. The work is highly complex due to geometric limitations of the station and adjacent works, the heterogeneity of the rock mass and the dense occupation at surface. The structural behaviour analysis of the station was performed using 2D and 3D numerical models, as well as results obtained through the observation of the station.

1. INTRODUÇÃO

A parte central da rede do Metro do Porto é subterrânea, baseando-se na construção de dois túneis, recorrendo a duas tuneladoras TBM-EPB. A rede do Metro inclui ainda o reconvertido túnel da Trindade e um túnel de serviço construído pelo método SEM. Nesta rede central, estão incorporadas 11 estações subterrâneas, cuja construção constituiu um grande desafio, dada a existência de zonas densamente edificadas, as características geomecânicas do maciço e a interacção das escavações com as infraestruturas vizinhas. As estações subterrâneas são basicamente formadas por uma galeria principal, longitudinal, onde se insere a plataforma e os cais laterais, e por outra galeria transversal à longitudinal, albergando ligações a um poço vertical. Devido à sua complexidade técnica, associada à heterogeneidade do subsolo, as pequenas coberturas e às estruturas envolventes, estas estruturas obrigaram a grande rigor construtivo e constituíram o maior desafio do projecto do Metro do Porto.

De entre as estações subterrâneas, destaca-se a estação Faria Guimarães, pelas suas dimensões e complexidade, cujo estudo detalhado é objectivo deste trabalho. A estação está inserida na linha S do Metro do Porto, que faz a ligação entre o Hospital de S. João, no Porto, e Santo Ovídeo,

em Vila Nova de Gaia, com uma extensão aproximada de 8,6km, sendo 3,9km realizado através de TBM. A estação encontra-se em pleno tecido urbano do Porto, desenvolvendo-se segundo o alinhamento do túnel na rua Faria Guimarães realizado através de TBM, com o centro de estação localizado no cruzamento formado pelas ruas Fonseca Cardoso, Faria Guimarães e Paraíso (Figura 1). Está situada numa zona muito sensível devido à elevada densidade habitacional, agravada pela idade de alguns dos edifícios, dificultando a previsão de danos provocados à estrutura; ao elevado volume de tráfego, por se situar numa das principais saídas do centro da cidade do Porto; às limitações de espaço para a realização da obra; e à grande heterogeneidade do maciço granítico.

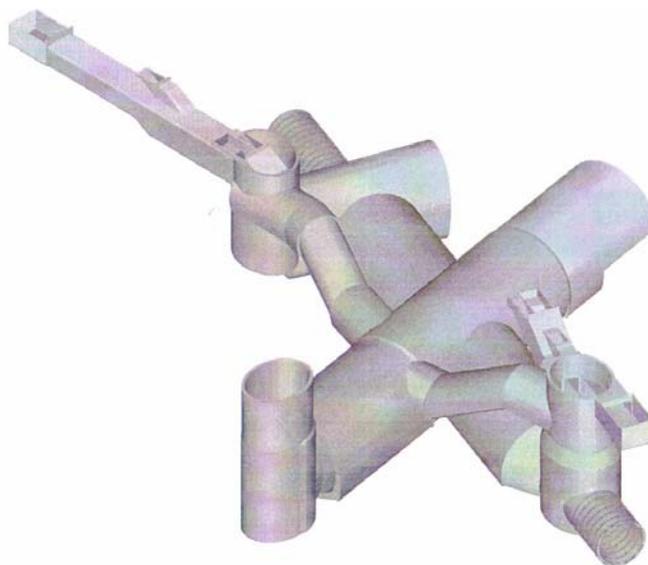


Figura 1. Perspectiva das galerias e poços

De todas as estações da primeira fase do sistema de Metro do Porto, esta é a que apresenta maior volume de escavação subterrânea, sendo construída a partir de três poços construídos para o efeito: poço da rua Fonseca Cardoso, da rua Faria Guimarães e da rua do Paraíso. A análise estrutural da estação foi realizada utilizando modelos numéricos 2D para determinação de tensões e de assentamentos em secções críticas da estação e um modelo 3D para avaliação do comportamento estrutural na zona de intersecção das duas galerias principais. Apresentam-se, ainda, alguns resultados referentes à observação da obra.

2. CARACTERIZAÇÃO DA ESTAÇÃO

A estação é composta por duas galerias, que se cruzam obliquamente, sendo a intersecção entre as galerias realizada no cruzamento da Rua do Paraíso com a Rua Faria Guimarães e a Rua Fonseca Cardoso. As galerias foram escavadas pelo método SEM, com o túnel circular já existente aquando da construção da estação. A intersecção entre as galerias é a zona sujeita a maiores esforços, sendo portanto realizada no final da escavação dos dois túneis (Figura 1). A galeria realizada na rua Faria Guimarães, em conjunto com a realizada na rua Fonseca Cardoso, destinou-se ao cais de embarque da estação. A descrição do método construtivo seguido está indicada em detalhe na publicação de Ferreira *et al.* [1].

Como se referiu, a estação foi construída a partir de três poços de ataque. A escavação do primeiro poço – poço de Paraíso, começou no mês de Março de 2002, tendo os restantes poços iniciado a escavação em Agosto do mesmo ano. A construção dos poços envolveu a utilização de *jet grouting* com \varnothing 0,8m, a execução de banquetas laterais em lances de 6m e a aplicação

imediate de uma primeira camada de betão projectado de 4 cm de espessura, após a retirada da banqueteta. O processo repetiu-se, aplicando-se sucessivas camadas de betão projectado até atingir uma espessura de cerca de 40cm. Com o início de escavação, iniciou-se a drenagem do poço com furos espaçados em profundidade de 2 a 2m.

O túnel de circulação do Metro foi realizado através de uma tuneladora TBM-EPB. Foi utilizada para a construção desta linha subterrânea do Metro do Porto, o que permitiu menor impacto possível à superfície [2]. A escavação processou-se 24 horas por dia, 6 dias por semana e desenvolveu-se em modo fechado, devido à heterogeneidade do maciço granítico, bem como à possibilidade de aparecimento de poços ou minas não cadastradas. A tuneladora adoptada inicialmente pelo Metro do Porto, não possuía estas características, ou seja, não havia manutenção da pressão na frente de escavação através de uma mistura, o que acabou por provocar um grave acidente devido a uma sobreescavação provocada [3].

Para a construção da estação Faria Guimarães, foi, no essencial, utilizado o método SEM (Figura 2), tentando, através da interacção solo-estrutura, tirar o máximo de proveito possível das propriedades geomecânicas e hidrogeológicas do maciço, respeitando os seus limites de resistência e de deformabilidade, tendo em consideração os limites impostos pelas edificações pré-existentes.

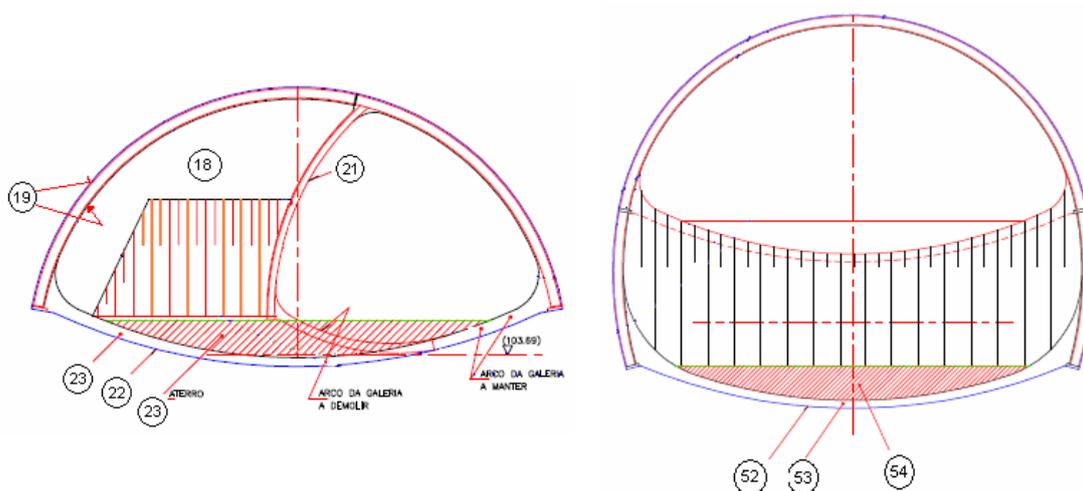


Figura 2. Esquemas representativos da execução do alargamento da galeria pela Rua do Paraíso

3. CARACTERIZAÇÃO DOS MACIÇOS ROCHOSOS

Na região metropolitana do Porto, o maciço de fundação mais usualmente encontrado é granítico, podendo este se encontrar nos mais variados estados de conservação. Caracteriza-se por apresentar grão médio a grosso, de duas micas. É uma rocha ácida com percentagem de SiO_2 superior a 65%, em que o excesso de sílica cristalizou sob a forma de quartzo livre. As cores predominantes neste maciço são as cores cinzentas, correspondendo à rocha sã, e a cor bege amarelado, correspondendo à rocha mais alterada. Os minerais predominantes são o quartzo, feldspatos (alcalinos), moscovites, biotites e minerais escuros. Como consequência da sua história de tensões as micas podem ocasionalmente ocorrer orientadas, conferindo à rocha uma estrutura do tipo gnáissico [4].

Na zona envolvente da estação Faria Guimarães, ocorre essencialmente o *Granito do Porto*, subjacente a depósitos de aterro, aluvionares e solos residuais, que podem atingir uma espessura total da ordem dos 9m. O maciço apresenta diversos graus de alteração, que se traduzem em variações de densidade, porosidade e resistência. Do ponto de vista tectónico, registam-se quatro sistemas principais de discontinuidades: i) 2 sistemas subverticais de orientação NW-SE e SW-NE; e ii) 2 sistemas com inclinação compreendida entre 50° e 70° de orientação N-S, emergentes para W. Para a determinação das características geotécnicas dos terrenos interessados pela estação, foi levado a cabo um plano de prospecção, tendo sido executadas várias sondagens mecânicas, acompanhadas da realização de ensaios *in situ*, nomeadamente, do tipo SPT, dilatométricos, pressiométricos, injeção de água do tipo Lugeon e de absorção de água do tipo Lefranc. Realizaram-se, ainda, tomografias sísmicas e a colocação de piezómetros para registo da evolução dos níveis de água. Foram colhidas amostras remexidas e intactas no decorrer da execução das sondagens, para realização de ensaios de laboratório, nomeadamente, ensaios de identificação, determinação do teor em água natural, ensaios de compressão uniaxial, entre outros. Com os dados obtidos, pela instrumentação colocada em obra, concluiu-se que o nível freático apresenta um desenvolvimento que acompanhava, em linhas gerais, o perfil topográfico. Com a execução da obra procedeu-se ao rebaixamento do nível freático, através dos elementos de drenagem, mantendo-se este abaixo do nível da escavação.

Na Figura 3, apresenta-se um perfil geológico interessado pela estação. Mais informação pode ser encontrada na publicação de Salgado e Fernandes [5].

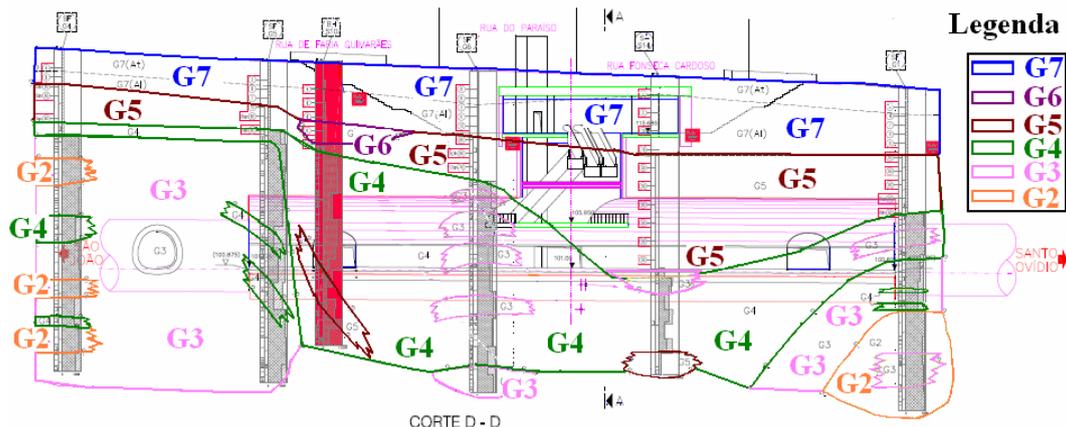


Figura 3. Perfil geológico interessado pela galeria cais de embarque

Com base na informação disponível, proporcionada pelas campanhas de reconhecimento, foram identificadas as características geomecânicas do maciço. Assim, foram definidos os parâmetros geotécnicos associados ao granito para os diferentes graus de alteração, sendo agrupadas as zonas de maciço rochoso suficientemente homogéneo sobre o ponto de vista da alteração da litologia (Quadro 1). Foi feita uma análise estatística das condições geomecânicas associadas a cada classe de alteração, com particular referência à estrutura, à intensidade de fracturação do maciço rochoso e às condições das discontinuidades. Foram, então, definidos os agrupamentos geomecânicos com características homogéneas. Os parâmetros geomecânicos adoptados em projecto estão presentes nos Quadros 2 e 3. Para o cálculo das tensões horizontais foi considerado um valor de K_0 igual a 0,5, visto ser habitualmente considerado o mais adequado. Quanto ao coeficiente de Poisson (ν), considerou-se o valor de 0,15 para os maciços rochosos e de 0,25 para os maciços terrosos. Para o cálculo dos parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb através dos parâmetros de Hoek-Brown foram utilizadas fórmulas habituais [6].

Quadro 1. Caracterização geológico-geotécnica das unidades geotécnicas

Unidades geotécnicas	Características
A1	- Granito W1-3 > 90% - Restante maciço rochoso: granito W4-5
A2	- Granito 50% < W1-3 < 90% - Restante maciço rochoso: granito W4-5
B	- Granito W4 > 50% - Restante maciço rochoso: granito W3-5
C1	- Granito 50% < W5 < 90% - Restante maciço rochoso: bolas de granito (W1-3) e granito W4-6
C2	- Granito W5 > 90% - Restante maciço rochoso: granito W4-6 e algumas bolas de granito
D1	- Granito W6 (solo residual)
D2	- Aterro e/ou terra vegetal e/ou aluvião

Quadro 2. Parâmetros geomecânicos de projecto para o maciço rochoso

Grupos	Unidades	γ KN/m ³	m_b	s	E_d GPa
G1	A1-A2	25-27	7,45	6,9E-2	35
G2	A1-A2	25-27	3,2	7,5E-3	10,7
G3	A1-A2-B	23-25	0,98	7,5E-4	1,0
G4	B-C1	22-24	0,67	0	0,4

Quadro 3. Parâmetros geomecânicos de projecto

	Grupo	γ kN/m ³	m_b	s	σ_c MPa	E GPa	GSI	Hoek-Brown		Mohr-Coul.	
								m_i	a	c' MPa	ϕ °
MR	G1	26	7,45	6,9E-2	120	35	78	18,2	0,5	3,47	65
	G2	26	3,2	7,5E-3	60	10,7	59	16,3	0,50	0,6	62
	G3	24	0,98	7,5E-4	22,5	1	40	10,8	0,51	0,15	49
	G4	23	0,67	0	8	0,4	26	12,8	0,53	0,07	38
	G5	20	-	-	-	0,125	-	-	-	0,03	34
MT	G6	19	-	-	-	0,045	-	-	-	0,01	32
	G7	19	-	-	-	0,04	-	-	-	0	28

5. ANÁLISES NUMÉRICAS

Realizaram-se diversas análises numéricas: i) duas secções representativas das duas galerias principais, uma secção das Salas Técnicas (Rua do Paraíso) e uma secção da estação (Rua Fonseca Cardoso), sendo utilizado o programa *Phase²*; ii) a zona do cruzamento das duas galerias principais, que se reveste de extrema complexidade, recorrendo a um modelo 3D simplificado e sendo usado o programa *FLAC 3D*.

O programa *Phase²* permite uma análise do problema a 2D, tomando em consideração os parâmetros fornecidos pelo projecto (Quadro 3). A escavação foi considerada drenada, não havendo necessidade de ter em conta a presença da água. Ambas as secções em estudo estão situadas, aproximadamente, a 15m da extremidade das salas técnicas e da estação, respectivamente (Figura 4).

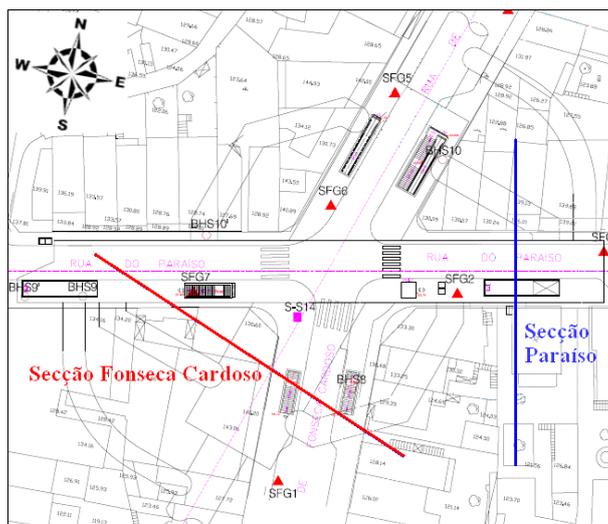


Figura 4. Secções analisadas da estação

Os suportes temporários e definitivos foram, essencialmente, constituídos por betão projectado, betão projectado mais cambotas, betão moldado e *jet grouting*. No Quadro 4, indicam-se as características atribuídas aos diferentes suportes. Foram consideradas as sobrecargas existentes à superfície.

Quadro 4. Parâmetros dos suportes utilizados

Suporte	γ kN/m ³	ν	c' MPa	Φ °	E GPa
Betão projectado (BP)	-	0,2	-	-	20
BP + cambotas	-	0,2	-	-	31,9
Betão moldado	25	0,2	2	45	32
<i>Jet Grouting</i>	24	0,2	0,5	35	0,5

Para a modelação das fases construtivas foram consideradas 8 fases construtivas. Nalgumas fases intermédias, foi utilizado um material fictício [5]. Na Figura 5, indica-se a discretização por elementos finitos utilizada na secção da rua Paraíso. Na secção pela rua Fonseca Cardoso, o maciço envolvente é constituído por maciços rochosos (G3, G4 e G5) e terrosos (G7). As cargas à superfície referem-se a vias de comunicação e a edifícios. A discretização da secção está indicada na Figura 6.

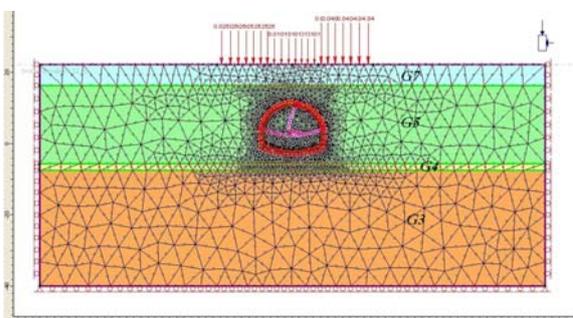


Figura 5. Discretização da secção da Rua Paraíso

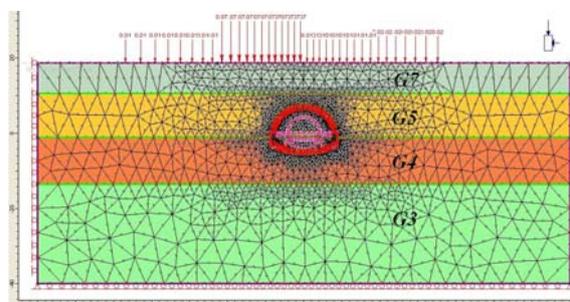


Figura 6. Discretização da secção da rua Fonseca Cardoso

De seguida, ilustram-se alguns resultados obtidos. Para a secção da rua Paraíso, apresentam-se, na Figura 7, deslocamentos totais na fase final construtiva. Os assentamentos à superfície apresentam-se na Figura 8, sendo o valor máximo de 5,5cm. Para a secção da Rua Fonseca Cardoso, os assentamentos finais foram de 5,7cm.

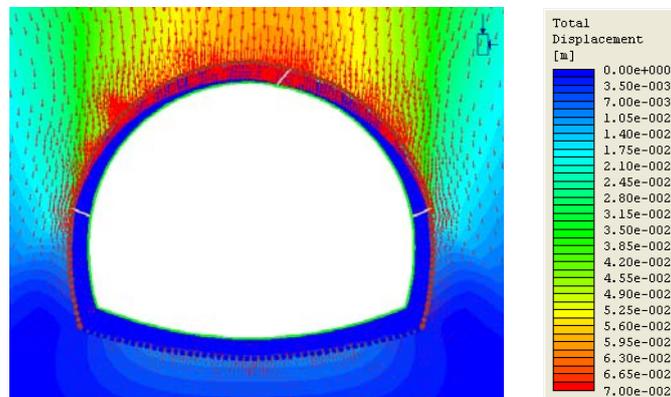


Figura 7. Deslocamentos totais na fase final da secção da Rua Paraíso

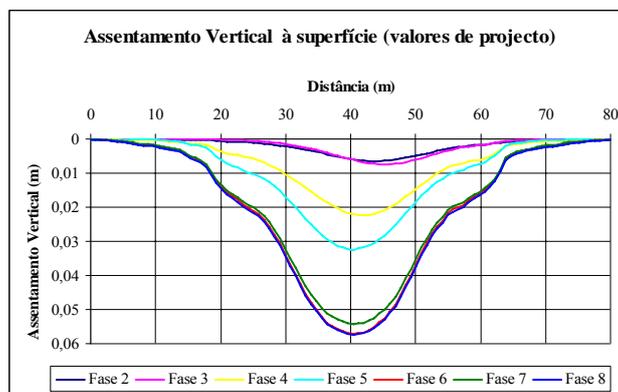


Figura 8. Assentamentos à superfície na secção da Rua Paraíso.

Foi construído um modelo 3D para avaliação do comportamento estrutural da zona crítica de intersecção das duas galerias principais, sendo os poços reproduzidos de forma simplificada. Na Figura 9, apresenta-se a malha de cálculo desenvolvida no programa *FLAC 3D*. Assumiu-se, numa primeira fase, a escavação em simultâneo das duas galerias com colocação imediata dos suportes por elementos de casca triangulares, admitindo que o comportamento era elástico linear. De seguida assumiu-se a construção faseada (5 fases), com comportamento elástico linear e não linear. No cálculo elástico, o assentamento à superfície na zona de intersecção foi de 6,7cm, tendo uma grande concordância com o valor observado, aproximadamente 6cm. O cálculo plástico obteve deslocamentos bastante superiores, o que significa que o faseamento adoptado não se ajustava ao comportamento real. Com efeito, para existirem apenas 5 fases, tiveram de se adoptar avanços consideráveis, provocando uma multiplicidade de zonas de rotura. Para afinar este cálculo terá de se aumentar significativamente o número de fases de forma a que se aproxime mais da realidade. Na Figura 10, assinala-se a bacia de assentamentos à superfície, enquanto que, na Figura 11, se ilustram deslocamentos numa secção coincidente com o modelo 2D na galeria principal.

No que respeita à observação da estação, refere-se que: i) 56 edifícios foram monitorizados com nivelamentos topográficos, tendo nalguns sido colocados clinómetros e fissurómetros; ii) foram adoptadas 16 secções monitorizadas ao longo das galerias com marcas topográficas e extensómetros múltiplos; iii) os 3 poços foram monitorizados com inclinómetros, piezómetros e

nivelamentos topográficos; e iv) ao longo das galerias foram estabelecidas 43 secções para medição de convergências. Na Figura 12, indicam-se secções observadas na estação, enquanto que, na Figura 13, nivelamentos na secção de intersecção entre galerias.

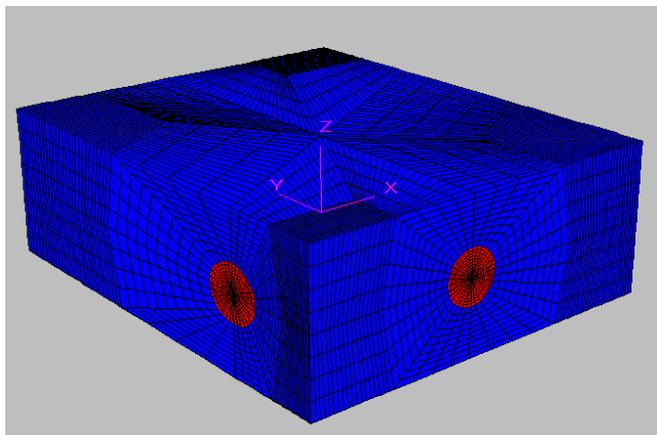


Figura 9. Modelo 3D da intersecção das duas galerias

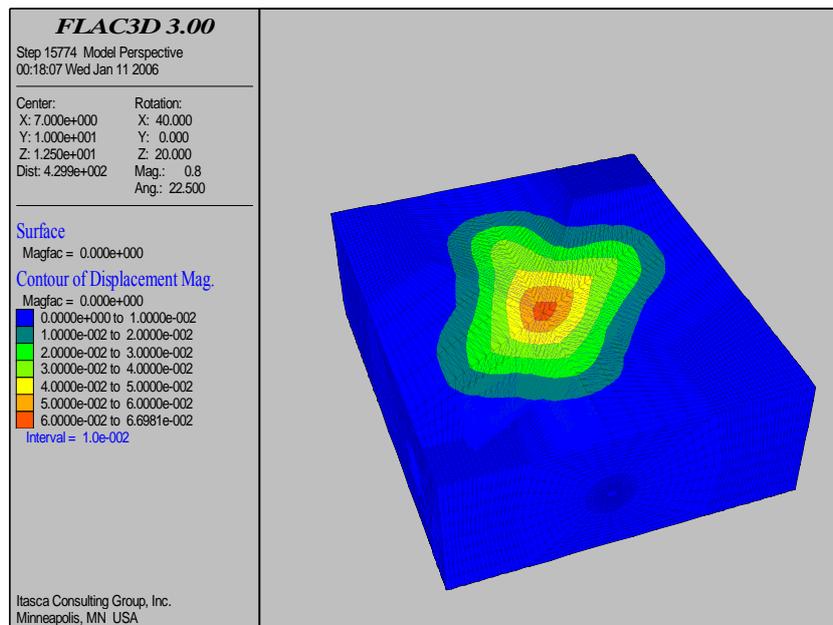


Figura 10. Assentamentos à superfície na zona de intersecção das galerias.

6 - CONCLUSÃO

A estação Faria Guimarães está localizada numa zona extremamente sensível da cidade do Porto, tendo sido dado particular atenção ao controlo dos assentamentos provocados pela construção da estação, dada a alta densidade populacional, agravada pela idade de alguns dos edifícios. Outro factor a contribuir para a dificuldade de construção da obra foi a limitação de espaço para a realização da mesma. Por fim, a grande heterogeneidade do maciço condicionou o processo construtivo, dificultando igualmente a modelação da estação. A dimensão das galerias, com cerca de 18,5m, e a intersecção entre ambas, associada à fraca resistência das camadas mais superficiais do maciço, tornou esta zona como a condicionante da construção da estação, sendo dada particular atenção ao método construtivo adoptado, bem como às medidas preventivas.

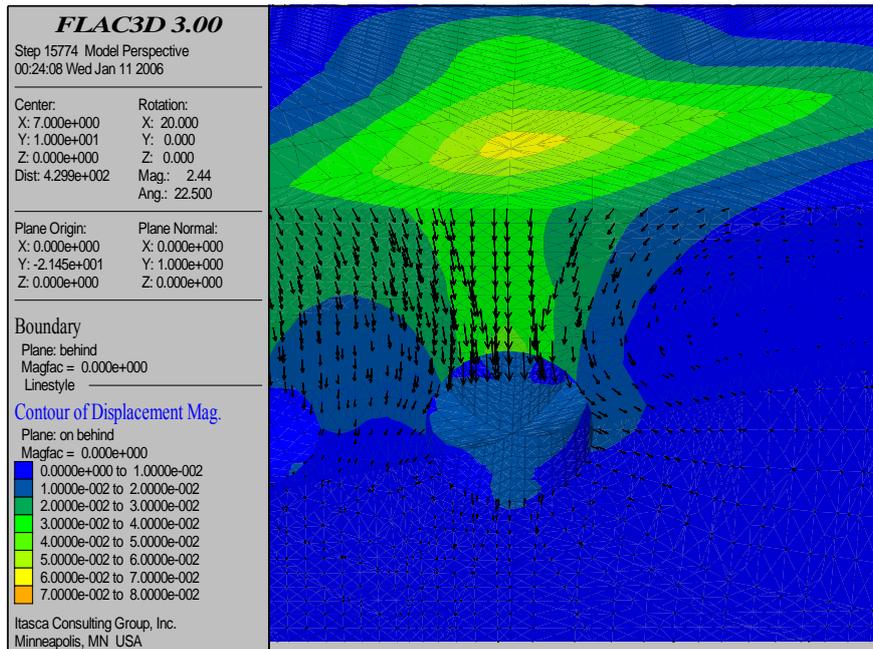


Figura 11. Deslocamentos numa secção coincidente com o modelo 2D, galeria principal

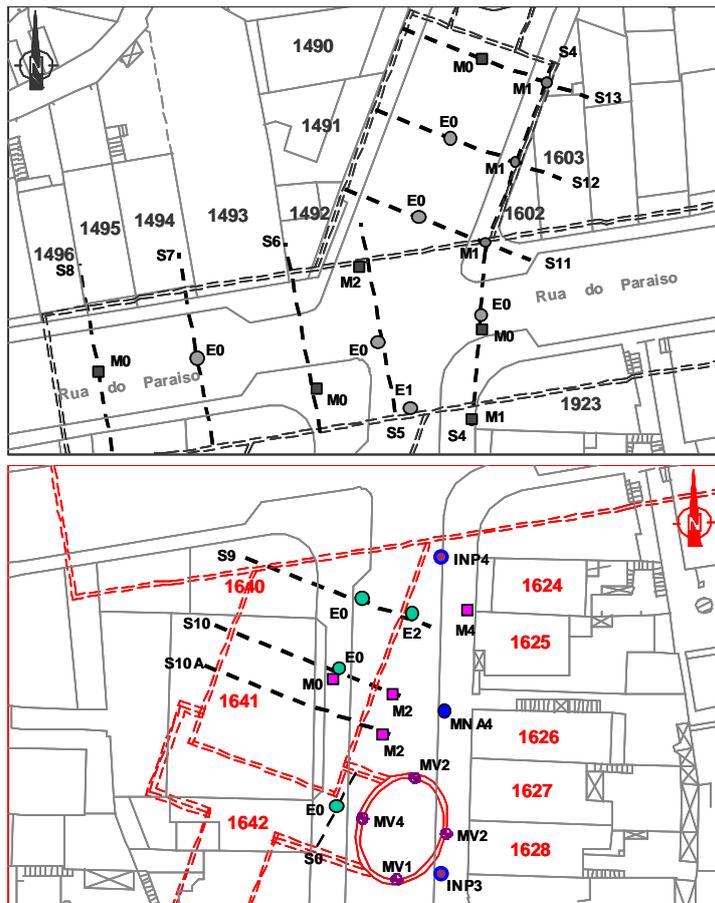


Figura 12. Secções observadas na estação

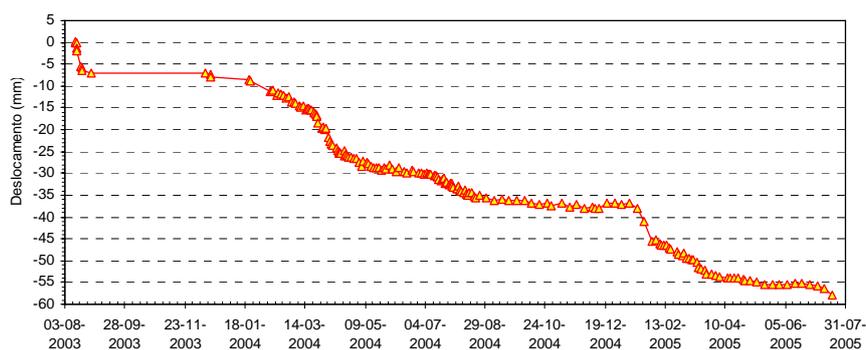


Figura 13. Nivelamento secção S5 na zona de intersecção entre as galerias

Pretende-se complementar o estudo com o aprofundamento das análises tridimensionais na zona de intersecção das galerias e melhor comparar valores calculados com os observados, bem como proceder à obtenção de parâmetros geomecânicos por retroanálise.

AGRADECIMENTOS

Agradece-se ao Metro do Porto a autorização concedida para a execução deste trabalho, bem como toda a informação disponibilizada sobre a estação Faria Guimarães.

Este trabalho foi financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia (FCT), Projecto POCI/ECM/57495/2004, intitulado *Geotechnical Risk in Tunnels for High Speed Trains*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] P. Ferreira, P. Salgado, T. Fernandes, L. Ribeiro e Sousa, 2^as Jornadas Luso-Espanholas, 2005.
- [2] P. Grasso, S. Xu, M. Fedele, G. Russo, G. Chiriotti, ITA 2003 Congress, 2003.
- [3] S. Babenderde, E. Hoek, P. Marinos, A. Cardoso, Risk Analysis in Rock Tunnels, Ed. Campos e Matos, Ribeiro e Sousa, Kleberg & Paulo Pinto, Balkema, 2006 (a publicar).
- [4] Normetro, Relatório, 2001.
- [5] P. Salgado, T. Fernandes, FEUP, Relatório, 2005.
- [6] E. Hoek, www.rocsience.com, 2000.
- [7] J. Curran, H. Reginald, T. Yacoub, Simpósio NARMS, Toronto, 2002.