

# METROPOLITANO DO PORTO – ESTAÇÃO DO BOLHÃO: PROJECTO DE ESCAVAÇÃO E SUPORTE

## OPORTO LIGHT TRAIN. BOLHÃO STATION: EXCAVATION AND SUPPORT DESIGN

Sarra Pistone, Raúl, *Director de Projecto, COBA, Consultores de Engenharia e Ambiente, Lisboa, Portugal, rp@coba.pt*

Maia, Cláudio, *Director de Projecto. TRANSMETRO ACE, Porto, Portugal, claudio.maia@transmetro.pt*

Bento, Jorge, *Eng. Geólogo. COBA, Consultores de Engenharia e Ambiente, Lisboa, Portugal, atb@coba.pt*

### RESUMO

A Estação do Bolhão integrada no troço comum das linhas A, B e C do Metro do Porto, está situada numa das principais zonas comerciais da cidade, escavada a cerca de 12 m de profundidade, debaixo de edifícios de vários andares de princípio de século e da Igreja das Almas, monumento declarado património cultural da cidade. Basicamente, o lay-out consiste em duas cavernas perpendiculares entre si com diâmetros de até 20 m. Um poço inclinado para escadas liga o mezanino baixo com o nível de mezanino alto e todos os edifícios de serviços se localizam num poço lateral escavado a céu aberto. As cavernas são escavadas em granito alterado e saibros graníticos. O recobrimento de rocha na zona de intersecção é variável com um mínimo de 4 m, sendo a cobertura restante constituída por saprólitos, aluviões e aterros. Apresentam-se no trabalho os aspectos relevantes do projecto de escavação das cavernas e os resultados obtidos após a construção.

### ABSTRACT

The Bolhão underground station is located in the common stretch of the lines A, B and C of the “Metro do Porto” (Oporto Light Train system) at a depth of 12 m, is situated downtown in one of the main commercial areas of the city, under important buildings dating from the beginning of the century and the declared town patrimonial heritage chapel “Capela das Almas”. Basically the station layout consists in two perpendicular caverns with diameters ranging up to 20 m. An escalator shaft connects the lower mezzanine with the upper mezzanine level and with the operational rooms placed in a lateral shaft open pit excavated in granite saprolites, alluvial soils and old landfills. The caverns were excavated in weathered granite and saprolite. The rock overburden at the intersection zone ranges down to a minimum of 4 m, being the remaining cover ground composed of saprolites, alluvial soils and old land fills. In this paper the main aspects of the excavation design of the caverns are discussed as well as the after construction main features.

### 1. INTRODUÇÃO

A Estação do Bolhão está integrada no troço comum das linhas A, B e C do Metro Ligeiro do Porto, que se situa no centro do comércio da cidade, desenvolvendo-se ao longo da Rua Fernandes Tomás, no cruzamento com a Rua Alexandre Braga, zona densamente urbanizada,

com a Igreja das Almas (património histórico da cidade) numa das suas esquinas e o tradicional mercado do Bolhão na outra.

O METRO DO PORTO, S.A. é o Dono da Obra. A NORMETRO é o agrupamento de empresas adjudicatário do projecto e da obra. A TRANSMETRO ACE, está a cargo das obras civis e contratou a COBA, Consultores de Engenharia e Ambiente, para a elaboração do projecto de escavação e suporte primário e definição das estruturas da estação a partir de um projecto de arquitectura contratado independentemente.

A estação subterrânea do Bolhão está constituída essencialmente por uma caverna principal onde se localiza o cais e por uma galeria transversal de direcção ortogonal à primeira, através da qual, é efectuado o acesso do mezanino baixo ao nível do cais. No cruzamento das duas galerias (Intersecção), a altura da secção da caverna é aumentada num troço com cerca de 20 m de extensão, de modo a permitir a inserção do acesso ao mezanino alto, realizado por meio de uma terceira galeria de menores dimensões, (Fig. 1).

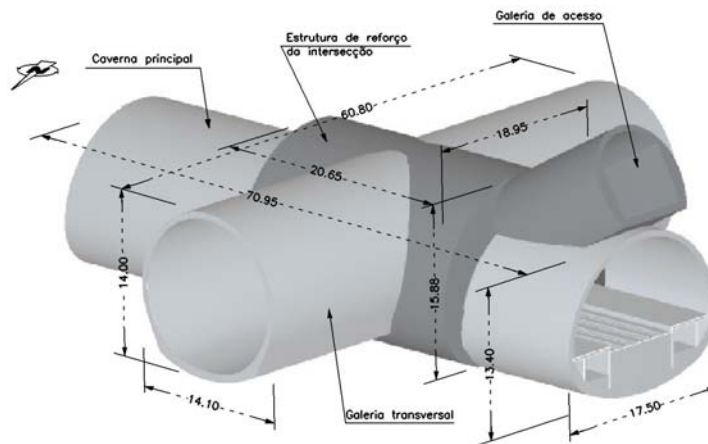


Figura 1 - Esquema tridimensional das cavernas da estação do Bolhão

Completam o conjunto de Obras enterradas os poços de acesso e salas de serviço escavados a céu aberto na rua Alexandre Braga e sob a rua Fernandes Tomás e ainda um poço de acesso e saída de emergência no Parque das Camélias e o túnel de ligação à caverna principal.

Na presente comunicação são abordados os aspectos relacionados com o projecto de escavação e suporte primário das cavernas e da intersecção das mesmas, considerada a estrutura mais sensível do conjunto.

A secção corrente da caverna com um comprimento de 70 m (envolvente ao túnel da via, previamente executado com TBM), integra uma abóbada definida por um arco de três centros, com uma altura de 13 m e uma largura de 18 m, tem uma secção de escavação de 186 m<sup>2</sup>. Na intersecção esta geometria alarga-se para uma altura de 16 m e uma largura máxima de 19 m, passando a secção de escavação a ter 244 m<sup>2</sup>.

A galeria transversal desenvolve-se ao longo de 62 m, com secção circular de 14 m de diâmetro, sendo a secção de escavação de 160 m<sup>2</sup>.

À data de escavação da estação (realizada pelo Método Observacional NATM, com faseamento em calote e rebaixo) já havia sido construído o túnel da via, com recurso a TBM e revestido com aduelas pré-fabricadas em betão armado. Este facto permitiu por um lado drenar o maciço antes da escavação e por outro obrigou a incluir o desmantelamento das aduelas no faseamento construtivo da caverna.

O betão armado adoptado no revestimento definitivo da estação, foi concebido para um período de vida útil de 100 anos como premissa do projecto. As espessuras são variáveis desde um mínimo de 0,5 m nas abóbadas da Caverna e Galeria transversal e de 0,6 m na abóbada da Intersecção, até um máximo na soleira da Caverna e intersecção com uma espessura de 0.70 m. O revestimento está dotado de um sistema de impermeabilização constituído por uma membrana de PVC com 2 mm de espessura e por um geotêxtil de protecção mecânica e drenagem.

## **2. METODOLOGIA DE PROJECTO DAS GALERIAS SUBTERRÂNEAS**

A metodologia seguida na elaboração do projecto e acompanhamento das obras por parte da A.T.O. (Assistência Técnica à Obra) é a explanada no fluxograma apresentado. Tratando-se de uma obra de carácter urbano, implantada na baixa da cidade em zona de elevada actividade comercial, o principal condicionante ao projecto e à construção foi a garantia da segurança das pessoas e a integridade dos edifícios adjacentes. Nesse sentido, e tratando-se de um edifício de elevado valor histórico e patrimonial para a cidade, a Capela das Almas foi naturalmente alvo de atenção especial (ver Fluxograma da Fig. 2).

## **3. MODELO GEOLÓGICO-GEOTÉCNICO**

Para a definição do modelo geológico-geotécnico procedeu-se numa primeira fase à reinterpretação de toda a informação geológica e geotécnica disponibilizada pela TRANSMETRO.

Na sequência da análise da informação existente e tendo em consideração a natureza e dimensão da obra e ainda as características geológicas dos terrenos, considerou-se necessário executar um conjunto de trabalhos de prospecção complementares, a fim de obter um esclarecimento adequado quanto ao modelo geológico, às propriedades dos terrenos e consequente definição dos parâmetros geotécnicos de projecto.

Foram executadas sondagens mecânicas de furação acompanhadas da realização de ensaios “in situ”, nomeadamente ensaios de penetração dinâmica do tipo SPT (“Standard Penetration Test”), ensaios dilatométricos e pressiométricos, ensaios de injeção de água do tipo Lugeon e ensaios de absorção de água do tipo Lefranc. Refira-se ainda a realização de tomografias sísmicas e a colocação de piezómetros para registo da evolução dos níveis de água.

Em termos geológicos, a área de implantação da Estação é caracterizada pela ocorrência do denominado “Granito do Porto”, subjacente a depósitos de aterro, aluviões e solos residuais graníticos, os quais podem atingir uma espessura total da ordem de 13 m. O “Granito do Porto”, geralmente constituído por um granito de duas micas, de grão médio a grosseiro, leucocrata, apresenta-se em diversos graus de alteração que se traduzem em variações das suas características mecânicas.

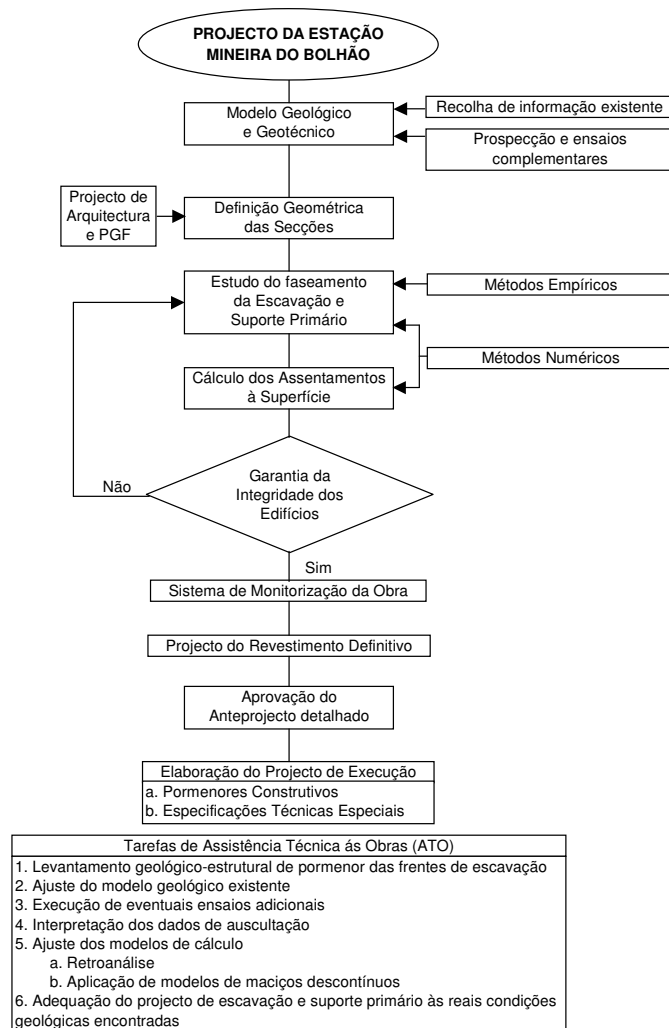


Figura 2 – Fluxograma: Metodologia de Projecto

O modelo geológico-geotécnico que serviu de base para a elaboração do projecto da estação foi apresentado por Sarra Pistone e Rebelo (2003).

Os complexos geomecânicos encontrados, com a caracterização em termos de graus de alteração e parâmetros de cálculo associados, figuram no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros de cálculo adoptados

Desig.	Graus de Alter.	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>	E MPa	Mohr-Coulomb		Hoek-Brown			Ko
				$\phi$ (°)	c' (kN/m)	Resist. Comp. Mpa	m	s	
G7	-	19	40	28	0	-	-	-	0.5
G5	W <sub>5</sub> F <sub>5</sub>	20	150	35	40	-	-	-	0.5
G4	W <sub>4</sub> F <sub>4-5</sub>	23	600	35	75	10	0.67	0	0.5
G3	W <sub>3</sub> F <sub>4 a</sub> F <sub>3</sub>	24	1500	40	150	25	0.98	7.5E-4	0.5

Na presente comunicação refere-se o esquema geológico dos terrenos encontrados durante a escavação das cavernas, segundo o registo sistemático realizado pela A.T.O. (Fig. 3).

Os materiais atravessados pela escavação correspondem na sua totalidade aos previstos no estudo geológico geotécnico. A situação tipo corresponde a materiais graníticos de graus de alteração diferenciados com bolsadas e faixas de material de pior qualidade, disseminados no seio de materiais de melhor qualidade.

O extremo poente da Caverna interessou, tal como previsto, essencialmente materiais do complexo geomecânico G3. A intersecção de ambas as galerias interessou materiais do complexo G3 e G4, na metade poente. Na metade nascente ocorreram materiais do complexo G5, não previsto para esta zona na fase de projecto. O terreno G5 consiste numa faixa de orientação N-S (Fig. 3), com forma de cunha na secção vertical (Fig. 7), balizado por materiais do complexo geomecânico G4.

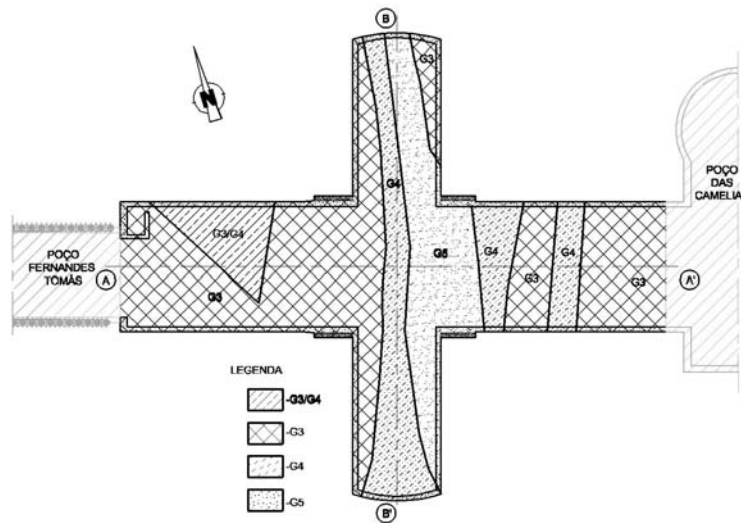


Figura 3 - Planta. Modelo geológico da estação

A ocorrência do terreno G5 tinha sido detectada durante a fase de estudo, mas o modelo previa uma estrutura plana com orientação NW-SE, e inclinada na direcção NE.

Dado que esta estrutura afectava a Capela das Almas tinham-se modelado, com critério conservador, secções de escavação localizadas totalmente em maciço G5.

A posição real dos terrenos mais alterados não só afectou a fundação dos edifícios históricos, como também comprometeu a estabilidade da zona de intersecção das cavernas.

Pelo facto das cotas do tecto de ambas as cavernas ser semelhante, a abóbada do recinto apresenta uma configuração quase plana, obrigando à construção de uma estrutura de reforço do suporte primário com características portantes e de rigidez suficientes para fazer face às condições adversas encontradas durante a construção.

#### 4. DIMENSIONAMENTO DO SUPORTE PRIMÁRIO

A análise numérica das escavações subterrâneas da estação do Bolhão foi realizada com o apoio dos programas PLAXIS v 7.2 e PHASES<sup>2</sup> v 5.027. Ambos utilizam o método dos elementos finitos e estão orientados para a solução de problemas geotécnicos a duas dimensões. Os programas possibilitam a utilização de leis constitutivas do tipo elásto-plástico, o que possibilitou a análise simultânea da estabilidade e da deformabilidade da cavidade. Através deste método de análise foi possível introduzir na modelação o efeito das tensões iniciais, da não linearidade dos materiais, da interacção maciço-suporte, da forma da escavação e do faseamento construtivo entre outros.

Para descrever o comportamento dos materiais foi utilizada uma lei elástica-linear perfeitamente plástica. No caso do PLAXIS o critério de rotura adoptado foi o de Mohr-Coulomb enquanto no caso do PHASES<sup>2</sup> foi possível utilizar o critério de rotura de Mohr-Coulomb para os solos (G5 e G7) e o de Hoek-Brown, no caso de rochas (G3 e G4). Os parâmetros geomecânicos utilizados estão resumidos no Quadro 1 e tiveram como base a informação fornecida pela Transmetro bem como na proveniente da prospecção complementar realizada.

A simulação do espaçamento entre a abertura da secção e a colocação do suporte primário, problema tridimensional, foi materializado através da adopção de uma taxa de relaxamento (load split). A taxa de relaxamento média adoptada foi de 0.5. Foram ainda estudadas variações consoante a natureza do cálculo e o tipo de suporte utilizado. Foi ainda analisada a estabilidade global do sistema e os deslocamentos provocados pela escavação, procedendo-se a uma libertação de tensões de 60% e posterior aplicação do suporte primário. Por outro lado, a verificação dos esforços no suporte primário foi realizada procedendo à libertação de apenas 30% das forças mássicas antes da aplicação do mesmo.

No dimensionamento do suporte primário considerou-se, para o betão projectado, uma resistência à compressão de 5MPa a 24h e 25MPa a 28 dias, um módulo de deformabilidade de 5GPa a 24h e 15GPa a longo prazo e uma área de aço correspondente à utilizada em cada secção. Assumiu-se em todos os casos escavação drenada.

Na figura 4 são apresentados alguns resultados da modelação numérica que permitiram validar as soluções propostas. Estas abrangem a escavação da Caverna, da Galeria Transversal e da Intersecção das galerias para horizontes geotécnicos distintos: secção em G3; secção em G3 com uma inclusão a meio de G5; secção em G3 com uma inclusão lateral de G5. Foi introduzida uma sobrecarga de 30 kN/m em toda a superfície excepto na zona da Rua Fernandes Tomás em que foi considerada uma sobrecarga de 10 kN/m.

A avaliação dos esforços actuantes na estrutura de reforço do revestimento primário da intersecção, durante a etapa de escavação, foi realizada com recurso a um modelo tridimensional de elementos finitos de casca, tendo o cálculo sido realizado com o programa SAP2000. A interacção com o maciço rochoso foi simulada através de molas com a rigidez correspondente ao coeficiente de reacção do terreno.

As acções consideradas no cálculo foram o peso próprio do revestimento e a carga transmitida pelo maciço. A quantificação desta última acção foi efectuada por extrapolação dos resultados das análises das escavações das secções da caverna e da galeria transversal realizadas com o apoio do programa PLAXIS v7.2., que têm em conta além de outros aspectos a interacção maciço-suporte, a forma e o faseamento da escavação.

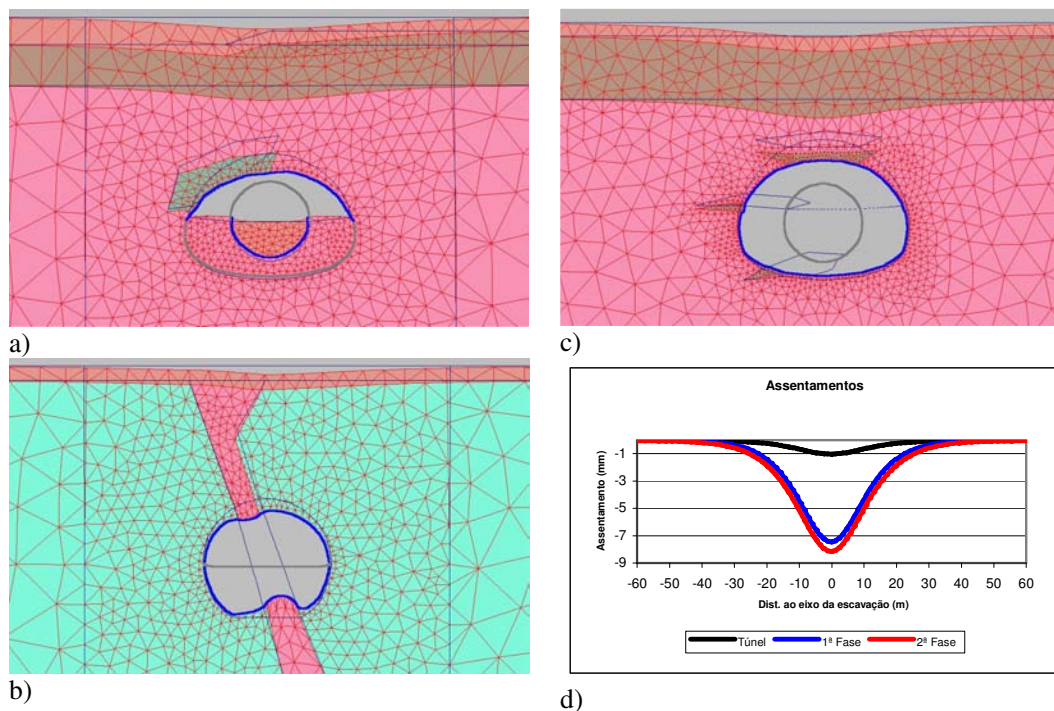


Figura 4 – a) Caverna: 1ª Fase G3-G4; b) – Galeria transversal: G3/G5; c) Intersecção: G3/G4; d) Intersecção: Assentamentos

## 5. METODOLOGIA CONSTRUTIVA E SUPORTES PRIMÁRIOS

### 5.1 Metodologia construtiva geral

O projecto de escavação assumiu algumas premissas básicas. Uma vez que a escavação da caverna principal se realizaria após a execução do túnel da via, com o qual está alinhada e, reconhecida a presença de água no maciço optou-se por proceder à drenagem antecipada do maciço com recurso a drenos compridos, executados a partir da galeria TBM.

O projecto assumia a aplicação do Método Observacional. Assim, o método construtivo e suportes foram ajustados de acordo com as reais condições geológico-geotécnicas encontradas e de acordo com a resposta do maciço à escavação, quantificada no sistema de auscultação instalado.

Estava prevista a execução de prospecção em avanço, o que veio a acontecer com a execução de sondagens à rotação sub-horizontais, em complemento aos mapeamentos realizados na galeria TBM e na própria caverna e poços adjacentes.

A estação mineira foi escavada praticamente na sua totalidade a partir do poço da Rua Fernandes Tomás, contíguo ao desenvolvimento da caverna principal.

Relativamente ao faseamento adoptado na escavação, o qual previa numa fase inicial do projecto a escavação completa da caverna em duas fases seguida da construção do revestimento definitivo, e a posterior escavação da galeria transversal, acabou por ser modificada durante o

curso da obra por forma a disponibilizar um maior número de frentes de trabalho encurtando-se assim o seu prazo de execução.

O faseamento construtivo adoptado considerou duas fases de escavação principais, tanto para a caverna (incluindo a intersecção) como para a galeria transversal. Uma primeira fase correspondente à escavação da calote superior e uma segunda correspondente ao rebaixo. Assim, após escavação da primeira fase da caverna no extremo poente e câmara de intersecção, deu-se início à execução da estrutura de reforço do suporte primário da intersecção, enquanto isso procedia-se à execução da escavação do extremo nascente da caverna (primeira fase) e em simultâneo à escavação do poço de ventilação.

Terminado o reforço da câmara de intersecção, fez-se a derivação da escavação para a galeria transversal, sob protecção de uma série de chapéus de enfilagens, inicialmente pelo lado Sul (oposto à Capela das Almas) e posteriormente pelo lado Norte. Simultaneamente iniciou-se o rebaixo da caverna, que, passando pela galeria transversal permitiu aceder às frentes de escavação do rebaixo desta. Posteriormente procedeu-se à escavação fina da soleira e ao seu travamento com arco invertido de betão na câmara de intersecção e extremos adjacentes da galeria transversal.

Por último é escavado o poço de escadas inclinado de acesso do mezanino alto ao mezanino baixo, obliterando o suporte primário da intersecção e caverna nascente em negativo deixado no revestimento definitivo.

## **5.2 Caverna e galeria transversal**

Foram desenvolvidas soluções distintas para a abordagem à problemática da escavação da Caverna e da Galeria Transversal da Estação, para os diferentes cenários geotécnicos: complexos geomecânicos tipo G3, tipo G5 e G4 no seio de G3.

Reconhecida a presença de água na zona interessada pelos trabalhos subterrâneos, foi prevista a execução prévia de drenos radiais, a partir da galeria executada pela tuneladora, para permitir o rebaixamento antecipado do nível freático. Independentemente dos drenos instalados a partir do interior da galeria TBM, durante a escavação, foram executados furos de drenagem, também providos de geodreno, tanto na frente da escavação como no seu contorno distribuídos em função das condições hidrogeológicas encontradas. Estas medidas permitiram um rebaixamento eficaz do nível freático de acordo com o pressuposto do projecto.

A escavação da Caverna em secção corrente foi realizada em duas fases de escavação. A primeira fase correspondente à abertura da semi-secção superior da calote com a soleira provisória à cota ~70. A segunda fase corresponde à destroça a ser executada em várias sub-fases.

O suporte primário aplicado em complexo geomecânico G3 é constituído por betão projectado reforçado com fibras metálicas com 0.30 m de espessura, treliças metálicas do tipo PS 115 20/30 e pregagens tipo super swellex de 200kN afastadas de 1,5 m com 6 m na caverna e 4 m de comprimento na galeria transversal.

Sempre que no mapeamento da frente se registava a ocorrência de bolsadas de complexo geomecânico G4 com expressão e significado para a obra, as pregagens tipo super swellex foram substituídas por enfilagens auto-perfurantes ou pregagens de varão inclinadas a 45° em disposição troncocónica com 9 m de comprimento na caverna e com 6 m na galeria transversal. Em ambos os casos os avanços preconizados foram de 1,5 m.



Em complexo geomecânico G5, optou-se por horizontalizar as inclusões rígidas, materializadas por enfilagens autoperfurantes ou varões de aço, em chapéu troncocónico, com os elementos espaçados de 0,4m. O espaçamento entre treliças bem como os avanços foram aqui de 1,0m.

Na figura 5 apresentam-se os suportes primários previstos para a secção corrente da caverna e galeria transversal nos diferentes complexos geomecânicos. Uma pormenorização do método construtivo preconizado no projecto para as secções correntes foi publicada por S. Pistone e Rebelo, (2003).

### 5.3 Intersecção

A Caverna e a Galeria Transversal intersectam-se perpendicularmente na zona central, praticamente ao mesmo nível. Por motivos arquitectónicos, a intersecção apresenta uma secção maior, em termos de altura, em relação à caverna.

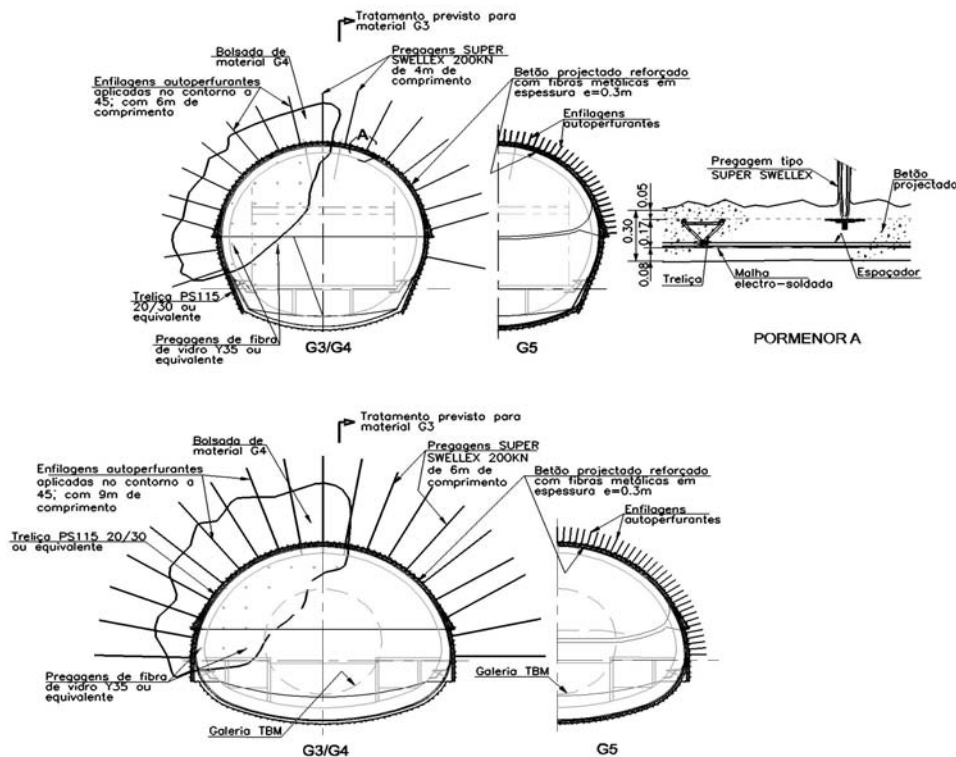


Figura 5 - Caverna principal e Galeria Transversal da Estação do Bolhão – Faseamento da escavação e Sup. Primários

A Intersecção ocorre em correspondência com o cruzamento das ruas de Santa Catarina e Fernandes Tomás, afectando directamente o edifício da Capela das Almas, considerado património histórico da cidade, na aresta nordeste.

O recobrimento total de terrenos no eixo de simetria é da ordem dos 12 metros, dos quais só 4 m correspondem ao maciço rochoso na metade Poente. Os restantes 8 m correspondem aos maciços G5 e G7. Procurou-se por esta razão, reduzir ao mínimo a altura da secção, condicionada pelos gabaritos mínimos definidos no anteprojecto de arquitectura.

Segundo o modelo geológico desenvolvido durante o projecto e confirmado com alguns levantamentos da frente do túnel (TBM), o maciço a escavar na intersecção seria basicamente complexo geomecânico G3 com zonas G4, consequência da marcada heterogeneidade do granito superficial neste bloco do Bolhão.

Não obstante, durante a execução da obra foi encontrado um bloco com maciço G5, por conseguinte foi necessário adaptar à intersecção o suporte para G5 da secção corrente bem como reforçar os emboquilhamentos da Galeria Transversal, recorrendo à execução de um conjunto de cinco chapéus de enfilagens, com distribuição em leque, com 50° de inclinação no primeiro chapéu, 40° no segundo e até 10° no quinto à entrada na Galeria Transversal e escavação desta a secção plena da calote. Foi assim possível ultrapassar as dificuldades imediatas de emboquilhamento da Galeria Transversal criadas pela geometria de tecto aplanado na abóbada e pela natureza do terreno classificado como pertencente ao complexo geomecânico G5.

O reforço na câmara de intersecção foi conseguido à custa de uma peça de betão projectado armado. Por motivos de faseamento da construção, foi necessário instalar ancoragens de barra nos pilares do reforço, bem como a construção de vigas de distribuição em betão armado na base da soleira provisória que permitiram dar início à escavação da galeria transversal e posteriormente ao rebaixo da caverna (Fig. 6).



Figura 6 - Aspecto geral da zona de intersecção após conclusão da escavação

## 6. PROGRAMA DE OBSERVAÇÃO DURANTE A OBRA

O plano de observação que serviu de base para o acompanhamento do projecto de escavação da estação foi apresentado por Sarra Pistone e Rebelo (2003). Dele faziam parte os aparelhos correntemente utilizados neste tipo de obras, a saber: Inclínómetros, Extensómetros multiponto,

marcas de superfície de nivelção precisa, piezómetros e marcas de convergência no interior das galerias lidas com recurso a métodos ópticos.

O plano de observação para a obra foi ajustado face às condições reais verificadas com a abertura das galerias e seu faseamento. O plano apresentado resultava das necessidades de medição para o melhor acompanhamento e segurança da obra, necessariamente adaptado aos constrangimentos existentes à superfície. Encontrando-se distribuído em 8 perfis de monitorização ao longo da R. Fernandes Tomás sendo que o perfil PM4 é o que se desenvolve ao longo da R. de Sta. Catarina.

### 6.1 Sistema de alerta e alarme

O sistema de alerta e alarme baseou-se não só nos deslocamentos máximos estimados como também, e com o mesmo grau de importância, nos seguintes elementos:

- Levantamento geológico-geotécnico detalhado e sistemático das frentes de escavação;
- Estudo das curvas deslocamentos-tempo, nomeadamente os incrementos de primeira e segunda ordem que correspondem à velocidade e à aceleração dos deslocamentos, respectivamente;
- Comparação entre os resultados sistematicamente obtidos em distintas secções de observação;
- Comparações com os resultados teóricos dos modelos numéricos;
- Interpretação de deformações do maciço em função da profundidade e segundo a posição das descontinuidades principais.

Os limites de alerta e alarme em termos de deslocamentos para a escavação da caverna principal e a galeria transversal da estação do Bolhão, foram definidos no projecto utilizando o critério de escavações independentes, ou seja considerando que a escavação da galeria transversal só começava uma vez completada a escavação da caverna principal, suporte primário e suporte secundário, segundo tinha sido originalmente definido.

Visando viabilizar as exigências do cronograma construtivo, a emissão da última versão do projecto de escavação e suporte primário da estação do Bolhão foi realizada sob a premissa de que a escavação da primeira fase da caverna e da galeria transversal deviam estar concluídas antes de executar a destroça de ambas as galerias, o que pressupõe um comportamento diferente do suporte primário e uma rigidez menor do conjunto.

O modelo conceptual aplicado baseou-se nos seguintes pressupostos: a) no caso de a escavação das galerias ser executada de forma independente, os deslocamentos de referência de cada galeria seriam semelhantes aos calculados em cada secção tipo com os modelos 2D utilizados, b) no caso de a escavação ser executada com faseamento vertical (como ocorreu na realidade), os deslocamentos de referência na intersecção seriam equivalentes ao somatório dos deslocamentos calculados para cada galeria.

Ainda foi aplicada uma segunda actualização dos deslocamentos, desta feita devida ao ajuste do modelo geológico verificado “in situ”. Assim, uma vez escavada a primeira etapa tinha-se um modelo mais realista dos terrenos atravessados, nomeadamente foi registada a presença de maciço tipo G5 na metade poente da intersecção da estação e galeria transversal.

Assim, os limites de alerta e alarme dos deslocamentos (assentamentos à superfície) revistos atempadamente e utilizados para o controlo das escavações, são os que figuram no Quadro 2.

Quadro 2 – Níveis de alerta e alarme

Zonamento geomecânico	Caverna						Galeria transversal						Intersecção		Intersecção	
	G3		G3/4		G5		G3		G3/4		G5		G3/4		G5	
Fases de escavação	1	2	1	2	2		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Níveis de alerta (mm)	11	12	11	12	12	13	4	5	5	5	6	7	16	17	18	20
Níveis de alarme (mm)	18	19	18	19	19	21	6	8	8	8	10	11	26	27	29	32

## 7. RESULTADOS DA MONITORIZAÇÃO - CONCLUSÕES

Verificou-se que uma vez concluída a escavação da estação e estabilizadas as leituras dos instrumentos de auscultação, os deslocamentos medidos foram da ordem de grandeza daqueles previstos nos critérios de alerta e alarme, presentes no Quadro 2.

Para os edifícios, em particular no caso da Capela das Almas, os níveis de distorção atingidos foram da ordem máxima de 1/1600 ao longo da R. de Sta. Catarina e de 1/2200 ao longo da R. Fernandes Tomás, valores estes muito abaixo dos limites impostos pelo estudo de avaliação de riscos dos edifícios (BRA) que apontava valores de distorção máxima aceitáveis para a Capela das Almas de 1/850 (limite de atenção).

Nas Figuras 7 e 8 apresentam-se perfis longitudinais da estação pela rua Fernandes Tomás e Santa Catarina, respectivamente. No mesmo perfil foram introduzidos os dados do modelo geológico disponível e, em escala adequada, as curvas de assentamento correspondentes aos episódios mais representativos da construção da estação.

Pode observar-se uma concordância razoável entre os assentamentos previstos e os registados, com uma certa assimetria das curvas em correspondência com a ocorrência do maciço G5 na zona de intersecção. Este fenómeno visualiza-se na planta de isolinhas de assentamentos acumulados, da Figura 9.

A abordagem adoptada, no que diz respeito à metodologia de projecto, revelou-se adequada para ultrapassar as dificuldades criadas pelas diferentes condicionantes inerentes à execução de obras subterrâneas pouco profundas em meio urbano.

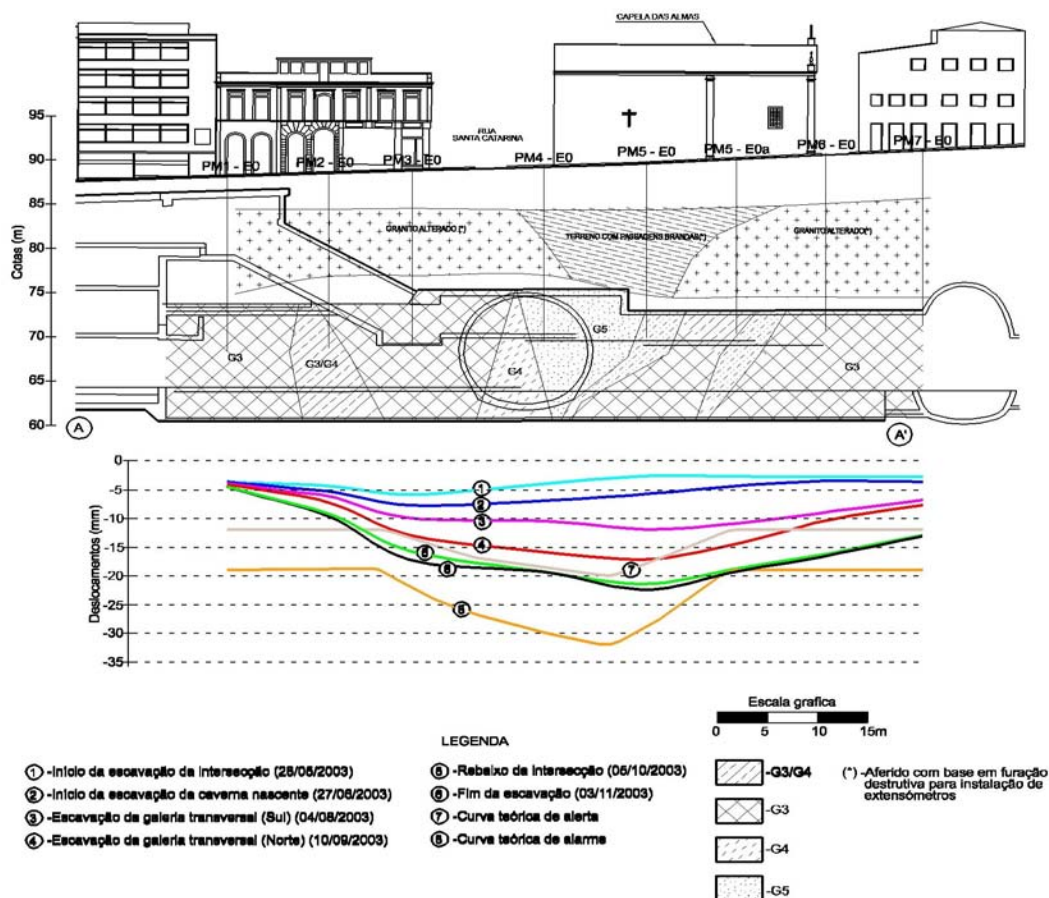


Figura 7 - Perfil longitudinal pelo eixo da caverna (Rua Fernandes Tomás).  
i) Modelo geológico registado durante a construção; ii) Assentamentos medidos.

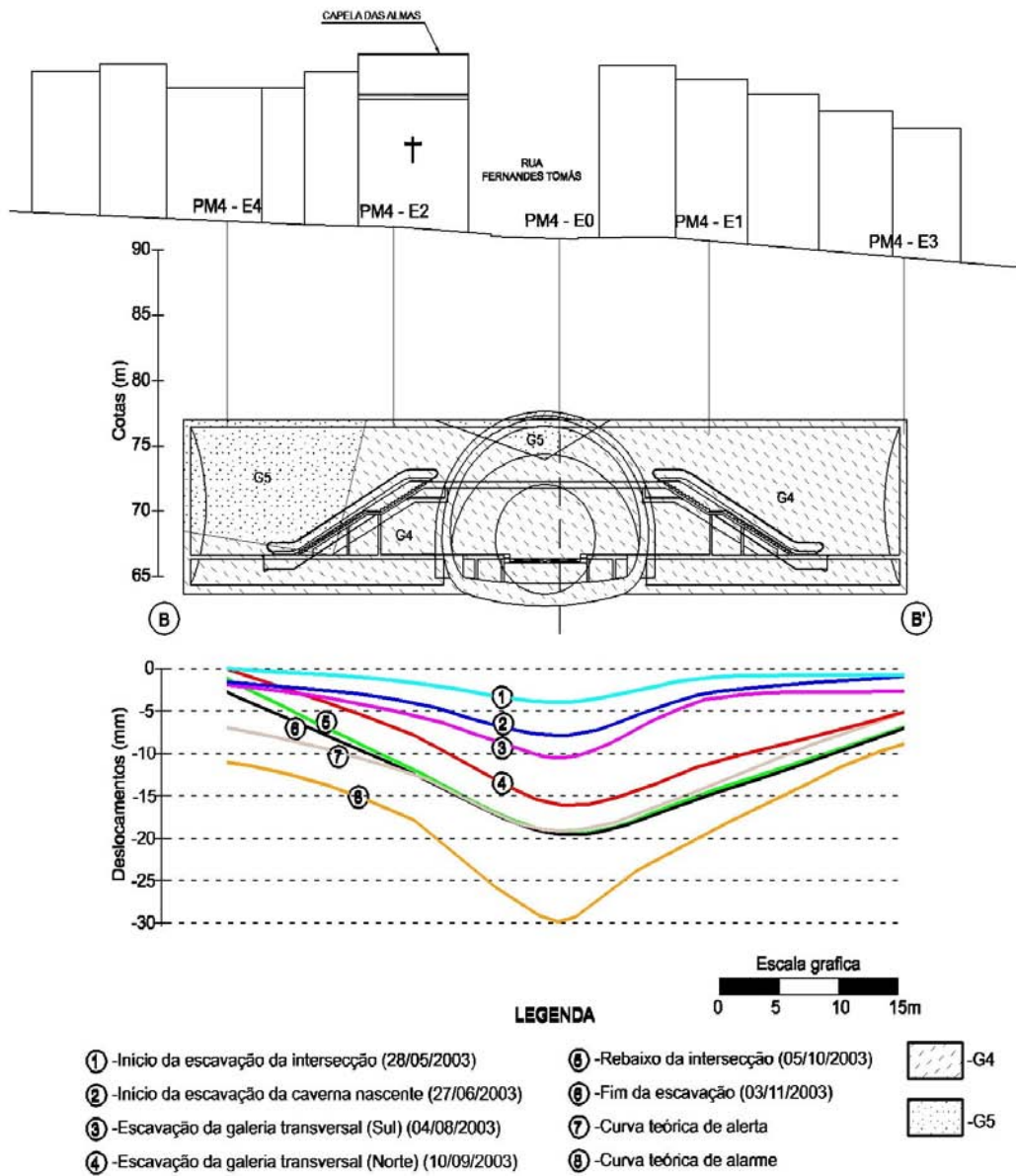


Figura 8 - Perfil longitudinal pelo eixo da galeria transversal (Rua Santa Catarina).

- i) Modelo geológico registado durante a construção;
- ii) Assentamentos medidos.

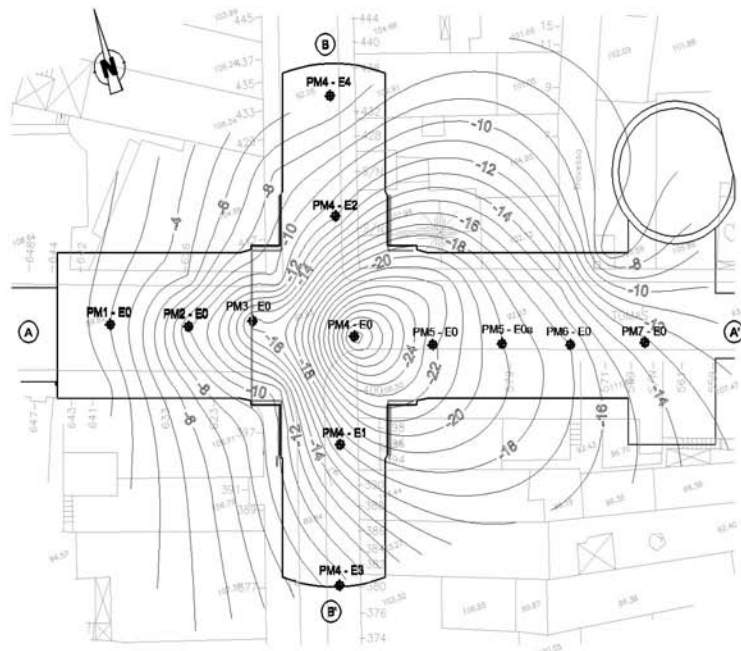


Figura 9 - Isolinhas de assentamentos e localização dos perfis de monitorização.

## 8. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Metro do Porto, S.A., pela autorização outorgada para a publicação do trabalho. Este agradecimento é extensivo a todas as pessoas que participaram na equipa de projecto e obra contribuindo para o sucesso do projecto.

## 9. REFERENCIAS

Coba, S.A. Projecto da Estação do Bolhão. Estação Mineira. 0/07/C/DE/04.07/233/TM/MD/263003/A/03 de 31/03/2003. Não publicado.

Normetro. Relatório Técnico – Relatório Geotécnico-geomecânico geral dos troços enterrados (linhas C, S e ramal de ligação C-S). Projecto de Execução 0/06/0/DE/00.00/220/TM/RT/012001/A/03(2000). Não publicado.

Sarra Pistone, R.; Rebelo, V. (2003) - Metropolitano do Porto – Estação do Bolhão. Modelo Geológico e Projecto de Escavação, Jornadas Hispano-Lusas sobre obras subterrâneas relevância de la prospeccion y observacion geotécnicas. CEDEX, Madrid (487,498).