

ESTAÇÃO HEROÍSMO DO METRO LIGEIRO DO PORTO. PROJECTO E ASSESSORIA GEOTÉCNICA À EXECUÇÃO DA OBRA.

HEROÍSMO STATION OF THE METRO DO PORTO LIGHT RAIL. PROJECT AND GEOTECHNICAL ASSISTANCE.

Cardoso, André M. Cambão, *Cenorgeo, Lisboa, Portugal, acardoso@cenorgeo.pt*

Conceição, Miguel F. Menezes, *Cenorgeo, Lisboa, Portugal, mconceicao@cenorgeo.pt*

Baião, Carlos J. Oliveira, *Cenorgeo, Lisboa, Portugal, cbaiao@cenorgeo.pt*

Brito, José A. Mateus de Brito, *Cenorgeo, Lisboa, Portugal, mbrito@cenorgeo.pt*

RESUMO

Aborda-se a concepção geral e as soluções adoptadas no projecto, assim como alguns dos aspectos mais relevantes do acompanhamento técnico da obra da Estação Heroísmo, inserida na linha Azul do Metro do Porto, a qual é constituída por um poço rectangular e quatro túneis. A diversidade de estruturas de contenção preconizadas para o poço resultou da enorme heterogeneidade do maciço interessado, conhecido por “granitos do Porto”, e da extrema proximidade das edificações envolventes, visto a obra se inserir num meio urbano densamente ocupado. São referidos os planos de observação implementados, assim como algumas das principais ocorrências registadas e destaca-se a importância da assessoria geotécnica em obra para um apoio directo e eficaz às diferentes equipas de produção.

ABSTRACT

This paper describes the design and the most important aspects of the geotechnical assistance of the Heroísmo Station construction, which involved the construction of a major excavation and four tunnels in the Blue Line of the Metro do Porto Light Rail. The diversity of retaining structures adopted resulted from the several restraints due mainly to the heterogeneous geological conditions of the “Porto granite” and the proximity of the numerous buildings involving the construction site. Finally it is briefly described the observation plan and it is pointed out the importance of the geotechnical assistance.

1. INTRODUÇÃO

O Metro do Porto, pensado de modo a constituir uma solução de transporte público eficiente e atractivo, é a maior rede de metropolitano construída de uma só vez em toda a Europa, tendo aproximadamente o dobro da extensão do Metro de Lisboa. Por forma a não ser colocado em causa o centro histórico da cidade do Porto, classificado pela UNESCO como Património Mundial, na zona central desta cidade todo o percurso das linhas é subterrâneo, situando-se a Estação Heroísmo nesta zona, na rua com o mesmo nome, entre as Estações de Campanhã e 24 de Agosto da designada linha Azul do Metro do Porto.

A estrutura da estação é do tipo misto, com um corpo executado a céu aberto, que constituiu o poço de ataque e se destinou à instalação dos acessos e salas técnicas da estação, e outros corpos

executados em escavação subterrânea, designados túneis 1 a 4, destinados à instalação dos cais de embarque, acessos, ventilação e saídas de emergência (Figura 1).

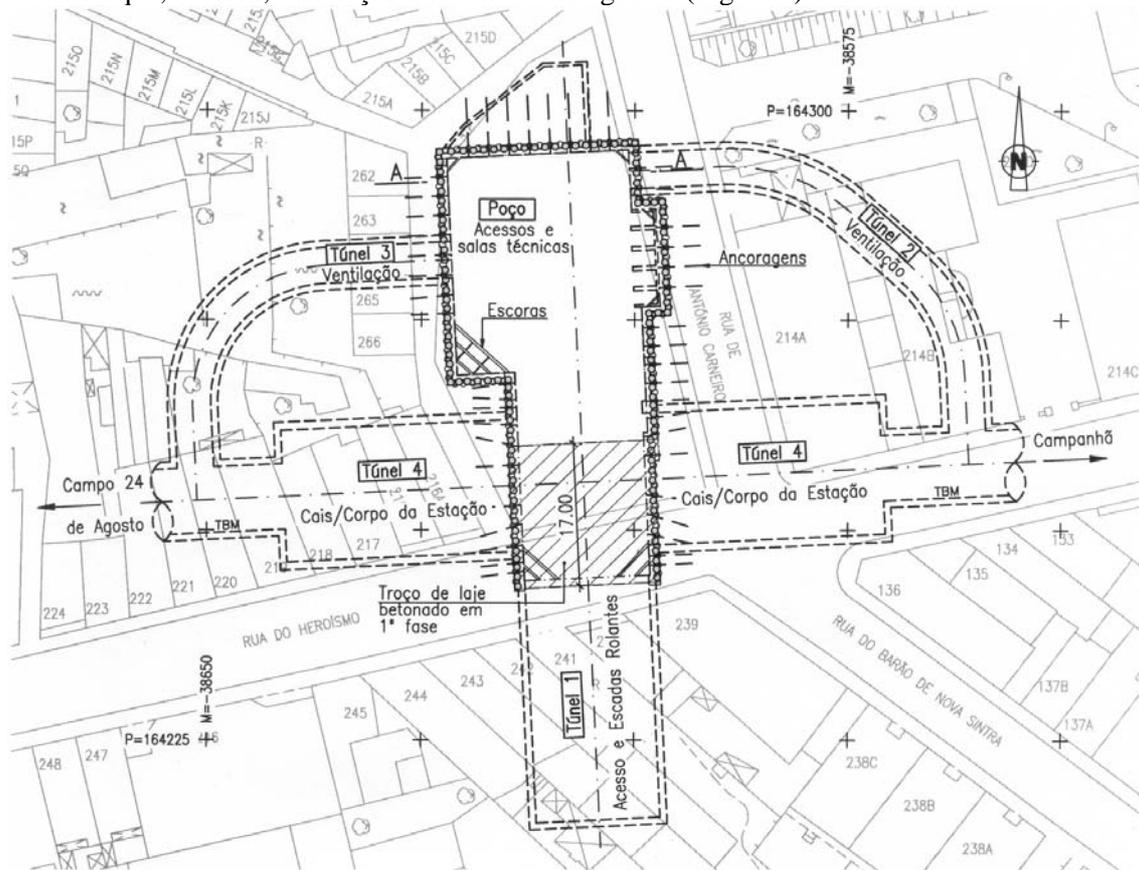


Figura 1 – Planta geral da Estação Heroísmo

2. CONDIÇÕES GEOLÓGICO-GEOTÉCNICAS

A caracterização geológico-geotécnica do maciço [1] onde se insere a estação foi baseada em trabalhos de reconhecimento efectuados em várias campanhas de prospecção. Estas campanhas envolveram, para além da realização de sondagens mecânicas acompanhadas de ensaios SPT, a execução de ensaios pressiométricos e de permeabilidade do tipo LeFranc. De forma a melhor se proceder à caracterização do maciço foram ainda realizados ensaios de bombagem em alguns dos furos de sondagem e ensaios de compressão uniaxial em algumas amostras recolhidas nas sondagens.

De acordo com os trabalhos de prospecção efectuados verificou-se que à superfície ocorrem materiais de cobertura constituídos por depósitos recentes de aterro arenoso e entulhos, com uma espessura variável entre 0,4 m e 3,6 m, os quais regularizam o tecto do substrato constituído por granitos de grão médio a grosseiro, leucocratas, de duas micas, conhecidos por “granitos do Porto”.

O maciço granítico apresenta um perfil de meteorização bastante variável e complexo, sendo ainda atravessado por alguns filões de quartzo muito fracturado. Com efeito, sob os aterros ocorre uma “banda” de maciço granítico medianamente alterado (W_3), com uma espessura de 8 a 18 m, abaixo da qual se verificou a existência de um horizonte de granito muito alterado a decomposto (W_{4-5}) que atinge profundidades de 24 a 35 m. Abaixo deste horizonte de piores características ocorre um maciço granítico medianamente a muito alterado (W_{3-4}) (Figura 2).

Refere-se que o nível freático se encontra, de uma forma geral, a cerca de 8 m da superfície, estando pois instalado na banda de maciço com grau de alteração W_3 .

As zonas do maciço não decompostas ou desagregadas apareceram predominantemente em núcleos de rocha pouco alterada e bastante rija, o que confere ao maciço uma elevada heterogeneidade, aspecto que teve reflexos nos processos construtivos adoptados, quer nas escavações, quer nos sistemas de suporte e de contenção periférica.

Os parâmetros geotécnicos considerados nos cálculos realizados na fase de projecto foram estabelecidos de acordo com os resultados de caracterização efectuados no âmbito do estudo para cada um dos grupos geomecânicos e são os que se apresentam no quadro seguinte:

Quadro 1 - Parâmetros geotécnicos adoptados nos cálculos

Grupo geomecânico	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (MPa)	k_0
Aterros	18	0	30	20	0,50
$g_5(W_5)$	20	50	36	150	0,45
$g_4(W_4)$	22	100	40	500	0,60
$g_3(W_3)$	25	150	45	1500	0,80
$g_2(W_2)$	26	400	50	13000	0,80

em que:

γ - peso específico do terreno;

c' e ϕ' - coesão e ângulo de atrito interno do terreno em termos de tensões efectivas;

E - módulo de deformabilidade do terreno;

k_0 - coeficiente de impulso em repouso do terreno.

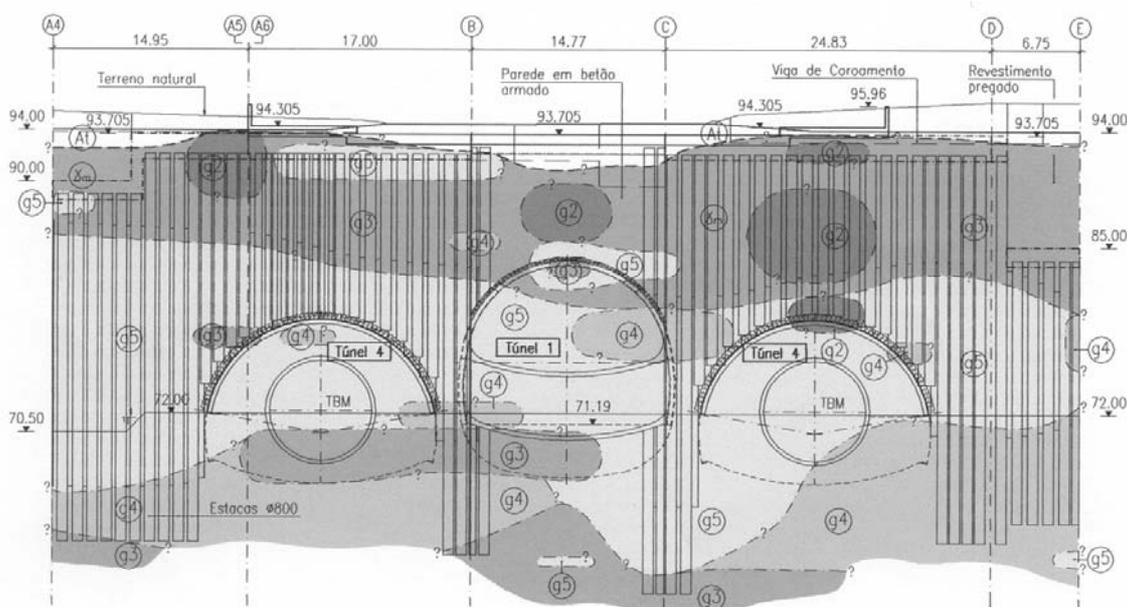


Figura 2 - Alçado geológico-geotécnico desenvolvido do lado Sul do poço

3. CONCEPÇÃO E DESCRIÇÃO GERAL DAS SOLUÇÕES PROJECTADAS

3.1 Poço

A estrutura da estação é do tipo misto (Figuras 1 e 2), com um corpo realizado a céu aberto, que constituiu o poço de ataque e onde foram instalados os acessos e as salas técnicas da estação, e outros corpos realizados em escavação subterrânea, destinados à instalação dos cais de embarque, acessos, ventilação e saídas de emergência.

A geometria do poço realizado a céu aberto é aproximadamente rectangular, com cerca de 52 m de comprimento e largura variável entre 16 e 25 m, ocupando assim uma área de 1035 m², com uma altura máxima de escavação de 29 m.

Em face dos vários condicionamentos existentes, nomeadamente os de índole geológico-geotécnica, o projecto [2] considerou ajustado estabelecer duas soluções tipo distintas para a estrutura de contenção do poço (Figura 3). A primeira, adoptada na generalidade da zona superior da estrutura de contenção, que interessou o maciço granítico medianamente alterado (W₃), com comportamento rochoso (Figura 4), consistiu na realização, de cima para baixo, à medida que se processava a escavação, de um revestimento pregado vertical (Figura 5), contra o qual foi betonada, em segunda fase, a estrutura definitiva do poço.

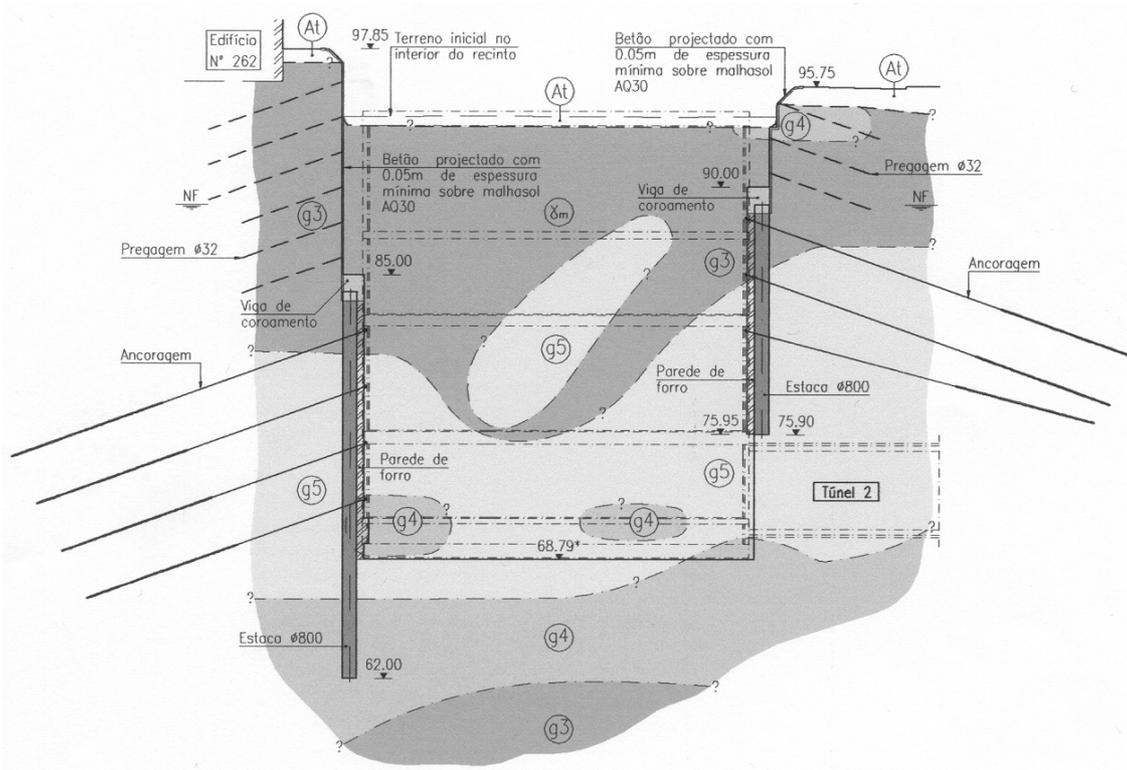


Figura 3 – Corte transversal na zona Norte do poço (Corte A-A da Figura 1)

A segunda solução, que garantiu a contenção em fase provisória da restante altura da escavação, consistiu na realização de uma cortina de estacas de betão armado com 0,80 m de diâmetro, espaçadas de 1,20 m entre eixos, secantes a colunas de “jet-grouting” tipo 2, igualmente com 0,80 m de diâmetro, executadas em segunda fase nos intervalos daquelas, segundo um

alinhamento ripado para o exterior em relação ao alinhamento das estacas de betão de cerca de 0,20 m.



Figura 4 - Aspecto do maciço granítico com grau de alteração W_3

Figura 5 – Vista do revestimento pregado vertical realizado na zona Norte do poço

Refira-se que, em termos de solução técnica, no projecto [2] se considerou ser apenas necessário garantir a impermeabilização da face da escavação nas zonas onde ocorreria o maciço granítico decomposto, evitando-se desse modo o arraste de material fino para o interior da escavação e os consequentes problemas devidos aos eventuais assentamentos verificados à superfície. Assim, não se pretendendo criar uma solução de contenção completamente estanque, a altura das colunas de “jet-grouting” a realizar nos intervalos das estacas de betão foi ajustada em fase de obra em função das condições geológicas reais, garantindo-se um encastramento das colunas de 1,0 m no substrato rochoso compacto e a sua materialização desde essa profundidade até à cota correspondente à base da “banda” de maciço granítico com carácter rochoso ocorrente à superfície (Figura 2). Este processo resultou, não só numa economia de prazo e de custos, mas também na adaptação da solução concebida às reais condições existentes.

Salienta-se que, de modo a permitir a rápida reposição do trânsito automóvel na zona do poço que invade a Rua do Heroísmo, através da rápida betonagem de um troço de laje de cobertura da estação, com uma largura de 17,0 m a contar do topo sul, se executaram todas as estacas dos alinhamentos nascente e poente localizadas nessa zona até à superfície do terreno (Figura 1).

Refere-se que, de modo a permitir a abertura em segunda fase dos diferentes túneis a partir do poço, foram deixados negativos com dimensões adequadas na estrutura de contenção periférica, sendo a estabilidade da escavação desses trechos assegurada através da materialização no contorno de cada túnel de um “guarda-chuva” constituído por colunas sub-horizontais de jet-grouting e da colocação nas frentes de escavação de pregagens em fibra de vidro injectadas.

Na Figura 6 apresentam-se quatro fotografias com aspectos gerais da execução dos trabalhos de abertura do poço.



a) Agosto de 2002



b) Janeiro de 2003



c) Agosto de 2003



d) Janeiro de 2004

Figura 6 – Aspectos gerais dos trabalhos de abertura do poço

3.2 Túneis

O Túnel 1 (Figuras 1 e 7) situa-se no prolongamento sul do poço realizado a céu aberto e integra os acessos aos cais Sul da estação. A respectiva secção transversal de escavação tem cerca de 232 m^2 de área, apresentando o túnel 30 m de comprimento, tendo sido executado com um recobrimento de apenas 11 m [3]. Como pré-suporte recorreu-se a colunas secantes de jet-grouting armado com 0,5 m de diâmetro, realizadas ao longo de todo o comprimento do túnel, apresentando estas 12 m de comprimento total e uma sobreposição entre fiadas de 2 m. Para garantir a estabilidade em fase provisória da parede terminal, que foi concebida com uma geometria abobadada, foram colocadas pregagens em tubos de fibra de vidro injectados.

A escavação foi realizada em três níveis, perfazendo oito fases executivas (Figura 7), por avanços de 1,0 m e sequente instalação do revestimento primário constituído por cambotas metálicas treliçadas associadas a 0,40 m de betão projectado, sendo os arcos invertidos em cada nível realizados a cada 4,0 m do avanço da escavação. O revestimento secundário foi materializado por 0,45 m de betão armado.

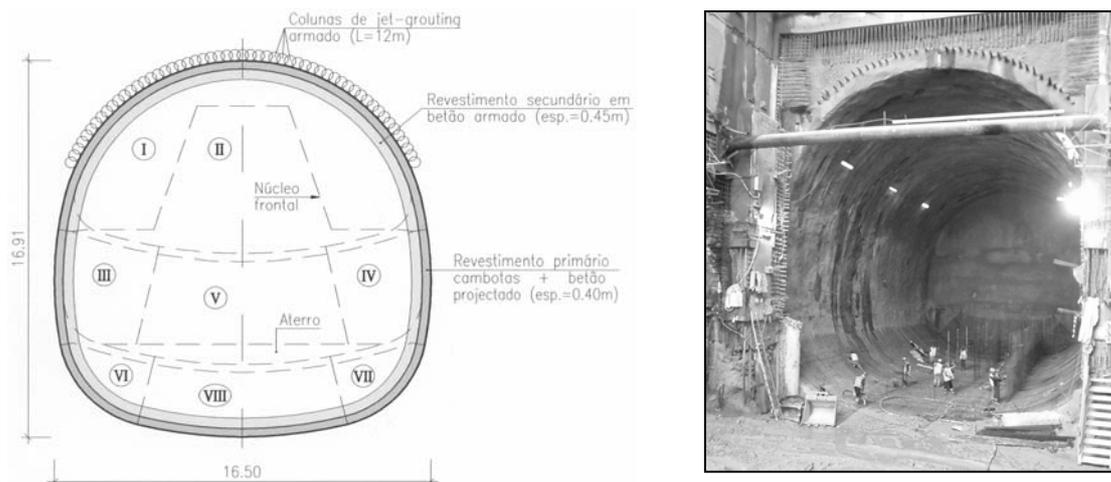


Figura 7 – Secção transversal tipo, faseamento executivo e vista do Túnel 1 na fase final de instalação do revestimento primário

Os Túneis 2 e 3 (Figuras 1 e 8), com uma secção transversal de 24 m², são posicionados em ambos os lados da estação e integram o respectivo sistema de ventilação. O Túnel 2, situado a nascente, tem 58 m de comprimento, apresentando o Túnel 3, situado a poente, um desenvolvimento de 47 m. Ambos foram executados com um recobrimento de cerca 19 m. No contorno dos respectivos emboquilhamentos foram executadas colunas secantes de jet-grouting armado, com 0,5 m de diâmetro e 12 m de comprimento. A escavação compreendia avanços de 1,2 m, divididos em duas fases, e sequente montagem de cambotas metálicas treliçadas associadas a 0,20 m de betão projectado. O revestimento secundário foi realizado em betão projectado armado com 0,30 m de espessura.



Figura 8 – Secção transversal tipo, faseamento executivo e vista do Túnel 2 a partir do poço na fase final de instalação do revestimento primário

Os Túneis 4 (Figuras 1 e 9), construídos por alargamento do túnel aberto com recurso à tuneladora que entretanto já tinha atravessado o recinto da estação, incorporam os cais de embarque da estação. Estes túneis possuem uma secção transversal com área aproximada de 180 m², tendo sido abertos com cerca de 15,5 m de recobrimento. Os túneis foram escavados em duas frentes a partir do poço, lado nascente e lado poente, tendo cada um cerca de 30 m de extensão. Ao longo de todo o seu comprimento foi instalado um pré-suporte constituído por colunas secantes de jet-grouting armado, de 0,5 m de diâmetro. Nas frentes de escavação foram

colocadas pregagens em fibra de vidro injectadas. Ambas as soluções de reforço foram aplicadas em fiadas de 12 m de comprimento e com uma sobreposição entre fiadas de 2 m.

A escavação foi faseada e compreendia a realização de um rebaixo, perfazendo quatro fases executivas, tal como ilustrado na Figura 9. Os avanços foram de 1,0 m e compreendiam a montagem do revestimento primário constituído por cambotas metálicas treliçadas associadas a 0,40 m de betão projectado, sendo os arcos invertidos realizados a cada 4,0 m de avanço da escavação. O revestimento secundário foi realizado em betão armado com uma espessura de 0,50 m.

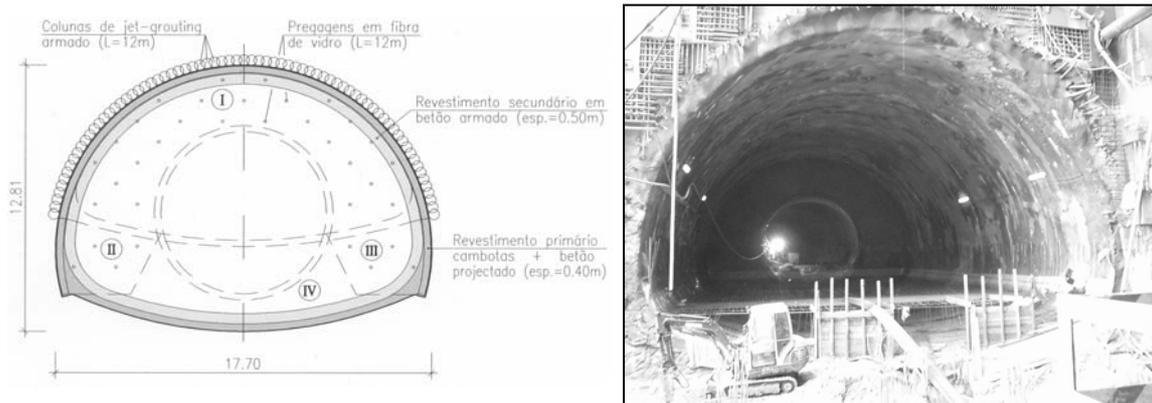


Figura 9 – Secção transversal tipo, faseamento executivo e vista a partir do poço do Túnel 4 nascente na fase final de instalação do revestimento primário

3.3 Principais quantidades de trabalho

A construção da Estação Heroísmo envolveu a realização de cerca de 42 269 m³ de escavação, sendo 24 847 m³ respeitantes aos trabalhos associados ao poço escavado a céu-aberto e 17 422 m³ resultantes da escavação dos vários túneis.

Na zona superior da estrutura de contenção do poço, onde se procedeu à execução do revestimento pregado vertical, foram realizadas 178 pregagens, correspondendo a um comprimento total de 1157 m.

No respeitante ao betão armado foram necessários 14 254 m³ de betão associados a 1870 ton de aço, respeitantes a armaduras ordinárias.

Nos quadros seguintes resumem-se, ainda, as quantidades associadas às estacas e às ancoragens executadas em obra.

Quadro 2 – Quantidades associadas às estacas realizadas

Estacas	Contenção	Laje de fundo
Quantidade (un)	126	20
Metros (m)	2948	272
Aço (ton)	196	29
Betão (m ³)	1637	142

Quadro 3 – Quantidades associadas às ancoragens realizadas

Ancoragens	960 kN	840 kN	720 kN	Total
Quantidade (un)	28	32	170	230
Comprimento (m)	523,5	568	3143,5	4514

4. OBSERVAÇÃO DA OBRA

Dados os importantes condicionamentos geológico-geotécnicos, em especial a grande heterogeneidade do maciço granítico interessado e o facto de a estação se inserir num meio urbano densamente ocupado, considerou-se indispensável o controlo do comportamento da estrutura de contenção, do terreno envolvente à escavação e das estruturas edificadas na proximidade da obra. Definiu-se, assim, um pormenorizado plano de observação destinado à leitura das seguintes grandezas:

- deslocamentos superficiais e em profundidade do terreno envolvente à escavação e das paredes de contenção;
- assentamentos e deslocamentos das edificações envolventes;
- abertura de fissuras nas edificações envolventes;
- pressões intersticiais da água;
- níveis freáticos na envolvente à escavação;
- gradientes hidráulicos no fundo da escavação;
- carga nas ancoragens;
- deslocamentos nas paredes de contenção;
- esforços nas paredes de contenção;
- vibrações (velocidade e frequência) nos edifícios.

Para a monitorização das grandezas referidas previu-se o reforço da instrumentação já instalada para acompanhamento da passagem da tuneladora, através da instalação dos seguintes dispositivos de observação [4]:

- 28 marcas topográficas de superfície;
- 3 calhas inclinométricas;
- 4 secções de medição de convergências;
- 7 piezómetros do tipo Casagrande, no exterior do recinto;
- 2 piezómetros do tipo Casagrande, no interior do recinto;
- 14 células eléctricas nas ancoragens;
- 16 barras extensométricas nas armaduras das estacas da estrutura de contenção;
- 18 réguas de nivelamento topográfico nas fachadas dos edifícios próximos da obra;
- 13 alvos ópticos nas fachadas dos edifícios próximos da obra;
- 3 clinómetros nas fachadas dos edifícios próximos da obra;
- 15 fissurómetros nos edifícios próximos da obra.

Numa segunda fase, quando do início da execução dos vários túneis, foram ainda colocados os seguintes dispositivos de observação [5], com frequência de leitura diária durante os trabalhos:

- 21 marcas topográficas de superfície;
- 26 extensómetros no maciço;
- 25 secções de medição de convergências nos túneis.

A frequência das leituras dependeu do andamento dos trabalhos, tendo-se, no entanto, realizado no mínimo uma leitura por semana.

Refere-se que a observação no decurso da obra da instrumentação instalada teve por objectivo principal verificar a adequação do processo construtivo preconizado às reais condições geológico-geotécnicas, através da comparação das leituras efectuadas com os valores estimados na fase de projecto. Desta forma, foram estabelecidos valores limite dos deslocamentos admissíveis para as estruturas projectadas, maciço e edifícios localizados na envolvente, tendo-se considerado suficiente estabelecer dois limites de alerta (atenção e alarme).

De entre os resultados obtidos nos diferentes dispositivos de monitorização salientam-se, pela sua importância, as leituras obtidas nas secções de convergência instaladas no Túnel 1, onde foi ultrapassado o limite de alarme estabelecido, com um valor de 24 mm, tendo-se registado uma convergência máxima de 37 mm, aspecto que se repercutiu em assentamentos máximos de 25, 27 e 31 mm, registados respectivamente na secção de nivelamento, no extensómetro e na régua de nivelamento instalados sobre o túnel.

Tal como seria expectável, o assentamento máximo registado nas leituras de nivelamento verificou-se numa das réguas instaladas no edifício 216a. Trata-se de um edifício bastante degradado localizado sobre o Túnel 4 ponte (Figura 1), onde se atingiu um valor de 37 mm, valor que, no entanto, foi inferior ao do limite de atenção definido em fase de projecto de 46 mm. Com efeito, o referido edifício encontrava-se na zona de influência de todas as bacias de subsidência geradas, quer pela passagem da tuneladora, quer pela abertura do poço, quer, ainda, pela abertura do referido Túnel 4.

Refere-se ainda que, apesar de se terem ultrapassado alguns dos limites de alerta estabelecidos em fase de projecto, nas várias vistorias efectuadas no âmbito da assessoria geotécnica aos edifícios localizados na envolvente da obra, se pôde constatar que os danos ocorrentes se resumiam ao aparecimento de pequenas fissuras ou à evolução de fissuras existentes antes do início dos trabalhos, enquadrando-se este tipo de dano na categoria de dano estético.

5. ASSESSORIA GEOTÉCNICA

A permanência em obra de um engenheiro residente da equipa de projecto surgiu da necessidade de se proceder a um acompanhamento técnico permanente da obra, com o objectivo primordial de apoiar directamente e de modo célere as diferentes equipas responsáveis pela produção na implementação e adaptação das soluções preconizadas no projecto às reais condições locais.

A actividade desenvolvida consistiu, para além do esclarecimento de dúvidas existentes na interpretação das várias peças constituintes dos projectos (Memória Descritiva, Notas de Cálculo e Desenhos), no acompanhamento permanente dos trabalhos, na procura de reconhecer e resolver em obra as dificuldades de implementação das soluções preconizadas, bem como na análise e interpretação de todos os resultados obtidos nos diferentes dispositivos de observação instalados e a sua correlação com os trabalhos efectuados, possibilitando, desta forma, proceder em tempo útil a adaptações e alterações ao projecto, otimizando as soluções inicialmente preconizadas.

A título de exemplo, refere-se uma das situações que implicou a intervenção dos técnicos integrantes da equipa de assessoria geotécnica, a qual se verificou quando durante a escavação dos Túneis 4 foram intersectadas algumas ancoragens integrantes do sistema de contenção do

poço, tendo no total sido danificadas 11 ancoragens, cinco do lado de Campanhã e seis do lado do Campo 24 de Agosto. Ao que foi possível apurar, este facto ocorreu em virtude de não ter sido cumprida a inclinação vertical e horizontal das ancoragens definidas no projecto aquando da respectiva furação.

Em face do ocorrido, e de uma forma conservativa, considerou-se a perda total da capacidade de carga das ancoragens intersectadas total ou parcialmente e uma perda de 50% da carga de serviço das restantes ancoragens localizadas nas proximidades dos emboquilhamentos dos túneis 4, tendo-se dimensionado e instalado uma solução de reforço, a qual consistiu na colocação, entre paredes de contenção opostas do poço e sobre os emboquilhamentos dos referidos túneis, de quatro escoras metálicas constituídas por tubos de aço da classe S235 de 508 mm de diâmetro e 12 mm de espessura (Figura 10).



Figura 10 – Vista da zona Sul do poço após instalação das escoras metálicas de reforço



Figura 11 – Aspecto do maciço interessado pela escavação do Túnel 3

Outra situação que envolveu a intervenção da equipa de assessoria respeita à execução dos Túneis 2 e 3, onde, na fase de projecto, se previa que interessassem um maciço com grau de alteração W_5 . No entanto, em face das características mecânicas mais favoráveis do maciço verificadas durante a sua escavação (Figura 11), foi possível proceder ao aligeiramento do faseamento executivo e do revestimento primário preconizados em projecto, sem prejuízo da segurança final. As alterações introduzidas consistiram no aumento do espaçamento entre cambotas, passando de 1,20 m para 1,50 m, e na dispensa de execução do arco invertido ao nível da soleira. Foi possível, desta forma, obter-se uma redução significativa, quer dos custos associados a esta natureza de trabalhos, quer do respectivo prazo de execução.

6. CONCLUSÕES

A Estação Heroísmo consistiu numa obra complexa, interessando um maciço granítico muito heterogéneo, a qual envolveu a execução de um poço com um importante volume de escavação e a uma considerável profundidade, bem como a abertura de quatro túneis mineiros abaixo do nível freático, dois dos quais de grande secção transversal.

Neste tipo de obras, com significativa componente geotécnica, é fundamental haver um acompanhamento eficaz por parte da equipa de projecto, aspecto que no presente caso foi conseguido através da presença em obra de um engenheiro residente integrante da equipa projectista. Com efeito, apenas deste modo é possível proceder em tempo útil às necessárias adaptações ao projecto, no sentido de otimizar, quer os processos executivos, quer as estruturas geotécnicas preconizadas, tirando partido das reais condições do maciço ocorrentes e atendendo à informação obtida nos vários dispositivos de observação instalados, possibilitando, assim, obter benefícios em termos de custos associados, de prazos de execução e mesmo de segurança.

Com efeito, apesar da complexidade da obra, considera-se que a conjugação de um projecto suficientemente desenvolvido e ajustado ao dispositivo geológico-geotécnico ocorrente, com a implementação em obra de um sistema de observação eficaz e, ainda, com a prestação pelo projectista de uma assessoria geotécnica efectiva, contribuiu de forma decisiva para o sucesso da obra, podendo afirmar-se que as metodologias de dimensionamento, de observação e de acompanhamento de execução dos trabalhos aplicadas se revelaram bastante adequadas.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Metro do Porto e à Transmetro a autorização concedida para a elaboração deste trabalho e para a utilização da informação nele contido, bem como à CJC pela colaboração prestada no desenvolvimento do projecto e no acompanhamento da obra.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Cenorgeo (2002). *Estação Heroísmo. Estudo geológico-geotécnico. Relatório Técnico.*
- [2] Cenorgeo (2002). *Estação Heroísmo. Projecto de escavação e contenção do poço.*
- [3] Cenorgeo (2003). *Estação Heroísmo. Projecto de execução das escavações subterrâneas.*
- [4] Cenorgeo (2002). *Estação Heroísmo. Interpretação dos resultados do levantamento estrutural e avaliação preliminar do risco. Plano de monitorização dos edifícios para a fase de escavação do poço. Relatório Técnico.*
- [5] Cenorgeo (2003). *Estação Heroísmo. Interpretação dos resultados do levantamento estrutural e avaliação preliminar do risco. Plano de monitorização dos edifícios para a fase de escavação subterrânea. Relatório Técnico.*