

ASPECTOS REAQUACIONADOS NA OBRA DASTAÇÃO DE SANTA APOLÓNIA DO METROPOLITANO DE LISBOA E.P.

THE LISBON METROPOLITANO SANTA APOLONIA STATION. REAL WORKS

Pina, Rui, *Ferconsult S.A., Lisboa, Portugal*
Jesus, Vitor, *Ferconsult S.A., Lisboa, Portugal*
Flor, António Tavares, *Ferconsult S.A., Lisboa, Portugal*

RESUMO

A Estação Santa Apolónia do Metropolitano de Lisboa está localizada na margem direita do rio Tejo, junto ao edifício da estação de Stª Apolónia da REFER, numa zona conquistada ao Rio Tejo no final do Sec.XIX e princípio do Sec.XX. As formações geológicas em que está implantada a estação do ML consistem, em aterros e aluviões sobrejacentes ao substrato Miocénico, constituído pelas areias da Quinta do Bacalhau. Foram identificados vários níveis piezométricos, confinados ou semi-confinados, que condicionaram a execução dos trabalhos.

Os trabalhos da estação podem-se dividir em três grandes zonas: Corpo da estação, zona do emboquilhamento (onde esta “estacionado” o escudo que executou o túnel) e acesso ao edifício da estação REFER. O processo construtivo das duas primeiras zonas, consistiu na execução de uma escavação tipo “Top-Down” com paredes moldadas e 3 níveis de escoramento (laje de cobertura, escoramento metálico e laje inferior em “jet-grouting”). Sob o edifício da Refer, foi necessário executar uma estrutura de recalce, salvaguardando o edificado que permaneceu sempre em funcionamento.

As principais dificuldades a resolver centraram-se no controlo das deformações (face à presença do edifício da REFER) e o controlo da água. Para tal foi necessário uma campanha de instrumentação específica, acompanhada de sucessivas retro-análises do projecto, com a sua adaptação às situações que foram interpretadas.

ABSTRACT

The Lisbon Metropolitano Santa Apolonia station is located on the right bank of the Tagus river. This zone was win to the river on the beginning of the XX century. The geologic formations are filling, aluvions and miocenic sands. There are some piezometric levels, confined , semi-confined and artesian. This levels conditioned the station construction.

The station works was divided in three zones: the station main “body”; the connection with the tunnel (the shield used to make the tunnel Baixa-Santa Apolonia was inside this zone) and the railway-station access.

The construction method of the two first zones was the “top-down” escavation with diaphragm walls. The works inside the railway station consists of the parcial demolition of the buildind strcture.

The main problems to solve was the deformation control and the water control.

It was necessary a survey plane, with back-analysis of the project, and the project adaptation to the new situations.

1. LOCALIZAÇÃO E CONFIGURAÇÃO

A Estação do Metropolitano Stª Apolónia está localizada paralelamente à Estação dos Caminhos de Ferro do mesmo nome e tem o comprimento de 155m e a largura transversal de 22,25m. A distância média entre a fachada da Gare Ferroviária e a parede da futura estação do Metro é de 7m, ver figura 1.

O traçado condicionou a implantação da obra, tanto em planta, como em perfil, além disso, os gabaritos para a passagem das composições condicionaram a concepção e o dimensionamento das estruturas, limitando a espessura máxima das lajes dos átrios, implicando a adopção de lajes pré-esforçadas.

A profundidade a que está localizado o P.B.V. assim como as exigências de exploração da estação impõem a existência de dois níveis de átrios, tendo condicionado a profundidade de escavação, e de igual modo, a solução estrutural e o método construtivo da laje da cobertura.



Figura 1 – vista da zona da obra – à esquerda Avenida e à direita a estação ferroviária da REFER

A estação contém dois cais laterais de 105m, cujos limites estão localizados entre o km 1176.979 com P.B.V. à cota – 9,160m e o km 1281.979 com P.B.V. à cota –9,475m. Possui também dois átrios intermédios nas extremidades da estação e um átrio superior central, de onde serão feitas as ligações à Gare Ferroviária a norte e à Gare fluvial e zona ribeirinha a Sul. Nos topos da estação desenvolvem-se as zonas técnicas de bombagem, ventilação e Sub - Estação de Tracção.

2. CONDIÇÕES GEOTÉCNICAS

Foi desenvolvida uma campanha de reconhecimento geológico e geotécnico com a realização de 17 furos de sondagem e ensaios “in situ” e em laboratório.

As formações geológicas interessadas pela obra do ML, são: depósitos de cobertura e uma sequência de formações miocénicas, com a seguinte descrição:

Aterros

C1 - Depósitos superficiais de terra vegetal e aterros arenosos, por vezes um pouco argilosos, com pedras e fragmentos de cerâmica.

C2 - Depósitos aluvionares de areias geralmente finas a muito finas, por vezes argilosas ou siltosas e areias grosseiras com areão e seixos rolados e cascalheira de base.

Miocénico

C4 – Areias da Quinta do Bacalhau – constituídas por areias finas e médias com ocorrências de níveis com características pétreas (arenitos e lumachelas).

C5 – Argilas do Forno do Tijolo – apresentam uma heterogeneidade acentuada em profundidade, nomeadamente no que respeita à composição granulométrica e à cor.

Na fase de anteprojecto foram adoptados os seguintes parâmetros geotécnicos:

Quadro 1 – Parâmetros geotécnicos

PARAMÉTROS GEOTÉCNICOS ADOPTADOS							
	γ_d kN/m ³	γ_{sat} kN/m ³	K m/d	E kN/m ²	v	C kN/m ²	ϕ (°)
C1 – Aterros	18	21	4.32	15000	0.30	1	30
C2 – Lodos	17	19	0.04 3	10000	0.40	1	20
C4 – Areias	20	21	4.32	60000	0.30	1	35
C5 – Argilas	20	21	0.04 3	80000	0.30	1	32

Escolheu-se para fundação das paredes moldadas a camada menos permeável (C5) e teve-se em atenção o gradiente hidráulico na interface solo - estrutura e a estabilidade do fundo da escavação face à rotura hidráulica resultante da diferença de cotas entre os níveis de água no interior e no exterior da escavação.

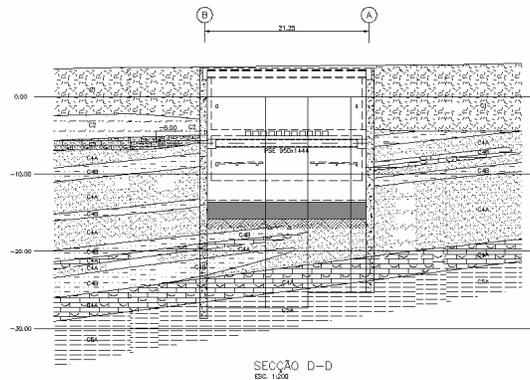


Figura 2 – Corte transversal da estação. Fundações das paredes moldadas na camada C5

3. PRESSUPOSTOS DO ANTEPROJECTO

Foi previsto que a escavação da estação fosse realizada ao abrigo de paredes moldadas com instalação de ancoragens provisórias.

Considerando a superfície do terreno variando entre a cota 3,85 m e 4,10 m e a cota do fundo variando entre a cota -13,35 m e -14,29 m, a altura média da escavação a suportar na contenção periférica da estação é cerca de 17m. No topo nascente onde serão realizadas os poços de bombagem, a altura de escavação junto às paredes moldadas, atinge os 20,7 m.

Foi também previsto que a escavação fosse executada em duas zonas distintas (Figura 3), nomeadamente:

- zona A entre o eixo 4 e o eixo 21. Nesta zona a contenção é materializada por uma parede moldada com 1,0m de espessura e equilibrada através de ancoragens;
- zona B entre o eixo 1 e 4. Nesta zona estava localizado o escudo. Assim este local teve restrições especiais, sendo a contenção materializada por uma parede moldada com 1,0m de espessura e equilibrada através de ancoragens e escoras de canto.

A existência do nível freático à cota +2,00 e a Gare Ferroviária a 7,0 m de distância, implicou a utilização de um conjunto de tecnologias especiais para se conseguir escavar e conter os terrenos até à cota -14,00, tendo-se adaptado paredes moldadas, ancoragens, jet-grouting e o rebaixamento do nível freático.

As zonas A e B constituem zonas de trabalho independente, nomeadamente qualquer anomalia que ocorresse numa das zonas não inviabilizava o prosseguimento dos trabalhos na outra zona dado que as mesmas se encontram separadas por uma parede moldada.

As premissas do dimensionamento da contenção periférica da estação do ML foram:

- minimização da deformação à superfície, nomeadamente os assentamentos na Gare Ferroviária;
- rebaixamento do nível freático no interior da contenção periférica; minimização do rebaixamento do nível freático no exterior da contenção;
- redução da pressão hidrostática no fundo da estação;
- soluções construtivas que possibilitassem um eficiente e eficaz andamento dos trabalhos;
- redução do intervalo de tempo de intervenção na Gare Ferroviária.

4. DO ANTEPROJECTO AO PROJECTO DE EXECUÇÃO

A empreitada é do tipo concepção–construção baseada numa variante do empreiteiro ao anteprojecto realizado pelo dono de obra, o qual foi descrito anteriormente.

As principais diferenças da proposta variante do empreiteiro foram as seguintes:

- **substituição dos 4 níveis de ancoragens por um nível de escoramento metálico;**
- diminuição da espessura da laje de jet-grouting de 5 para 2m.

A mudança de ancoragens para o escoramento deveu-se, fundamentalmente, a maior rapidez de execução, diminuição do risco de entrada de água pelas paredes e diminuição dos assentamentos na estação da REFER devido à furação para as ancoragens.

Para concretizar o projecto e a construção da estação no prazo previsto seguiu-se a seguinte metodologia:

- **aprovação do relatório geotécnico, contendo este os parâmetros de projecto;**
- aprovação do relatório conceptual, contendo a concepção geral da estação, a enumeração dos pressupostos de cálculo, regulamentação, critérios de projecto;
- aprovação de um relatório de cenários de risco;
- projectos de execução parciais consoante o avanço da obra.

Simultaneamente realizaram-se, semanalmente, ou sempre que necessário, reuniões em obra, nas quais era atempadamente analisado o projecto, de forma a dar resposta aos vários problemas existentes.

5. CENÁRIOS DE RISCO

Os cenários de risco, para este tipo de obra, são devidos a:

- colapso da parede moldada e dos escoramentos por carregamento excessivo;
- deformações de elementos da obra incompatíveis com a sua exploração/fases seguintes da construção;
- assentamentos na superfície, afectando as construções existentes, nomeadamente a Gare Ferroviária;

- rotura do fundo da escavação;
- abertura de fendas em estruturas de edifícios localizados na envolvente e rotura de canalizações;
- segurança dos arruamentos adjacentes, principalmente do lado Sul, em que as paredes moldadas estão a cerca de 2 m de uma das principais vias de circulação da cidade de Lisboa;
- controlo dos níveis piezométricos na escavação e no exterior da mesma.

As grandezas que se consideram para traduzir o comportamento da obra estão essencialmente ligadas à variação da geometria dos seus componentes e aos estado de tensão e deformação dos materiais utilizados nas estruturas.

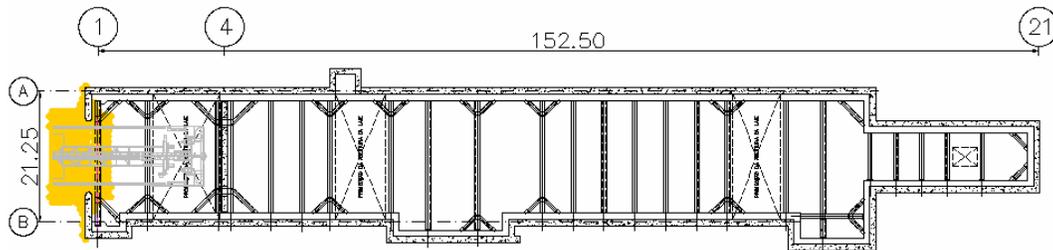


Figura 3 – Planta da Estação. Paredes moldadas com escoramentos

6. FISCALIZAÇÃO E REVISÃO DE PROJECTO

6.1. Introdução

Como foi referido no ponto 3, a parede moldada executada transversalmente no eixo 4, no interior da estação, permitiu a divisão dos trabalhos de execução da Estação St^a Apolónia em 2 zonas distintas:

Zona A, entre os eixos 4 a 21, com a seguinte sequência executiva:

- execução das paredes moldadas;
- execução da escora de “jet-grouting” com 2m, sob a laje de fundo, formada por colunas ϕ 1,80m;
- instalação da cobertura, constituída por vigas pré-fabricadas de secção em “T” e vão de cerca de 18m;
- escavação até à cota do escoramento metálico;
- execução de furos de alívio sob a laje de fundo da estação;
- instalação do escoramento metálico;
- escavação até à laje de fundo;
- execução da laje de fundo;
- execução dos pilares, contrafortes e lajes intermédias;
- remoção do escoramento;
- conclusão das estruturas.

Zona B, entre eixos 1 a 4, com a seguinte sequência executiva:

- execução das paredes moldadas;
- execução da escora de “jet-grouting” com 2 m de espessura, sob a laje de fundo, fora da vertical definida pelo escudo e no emboquilhamento (na envolvente do túnel já existente), com colunas ϕ 1,0m;
- execução de parte da laje de cobertura;
- escavação até ao nível do escoramento metálico;
- escavação até à base do escudo;
- remoção do escudo;

- sequência seguinte é semelhante à descrita para a zona A.

Nesta obra, de forte componente geotécnica, estão associados alguns factores de risco decorrentes do conhecimento limitado que se possui dos terrenos interessados, das incertezas de previsão do seu comportamento e da distribuição e variação quase aleatória das suas propriedades. Estas condicionantes põem em evidência a necessidade de recorrer a métodos complementares como a observação das obras durante a construção, através da instalação prévia de equipamento específico.

Procura-se, deste modo, obter a comprovação do modelo geotécnico que esteve na base do projecto, verificar as hipóteses admitidas no desenvolvimento do trabalho, medir os valores das grandezas de referência e despistar eventuais hipóteses de comportamentos anómalos das secções observadas.

Deste modo foi adoptada uma gestão por antecipação, ou seja, antever o mais cedo possível os problemas de forma a minimiza-los. A metodologia seguida foi a seguinte:

- **identificar as actividades a realizar a médio e longo prazo;**
- enumerar os riscos potenciais dessas actividades;
- analisar os resultados da instrumentação;
- com base na experiência resultante da obra e da interpretação das leituras da instrumentação ponderar o grau de adequabilidade do projecto;
- decisão entre manter o projecto ou adequá-lo à realidade.

Desta forma, o sistema de monitorização implementado na obra e na sua envolvente permitiu a validação de um conjunto de hipóteses:

- verificação das hipóteses de projecto no que respeita as características geomecânicas do maciço e do comportamento maciço/estrutura;
- controlar os parâmetros que podem influenciar a segurança da obra e verificar o factor de segurança da estrutura realizada;
- controlo dos eventuais danos nas estruturas adjacentes à obra;
- fornecer elementos ao projectista para a tomada de decisões relativamente ao processo de escavação, tratamentos de maciço, sua velocidade de execução e confirmação/revisão do projecto.

O plano de monitorização contemplou a medição dos seguintes parâmetros:

- assentamentos nos edifícios e estruturas adjacentes (régua de nivelamento);
- deslocamentos horizontais em edifícios ou outras estruturas (alvos topográficos);
- Evolução temporal das fissuras pré existentes (fissurómetros);
- assentamentos superficiais (marcas topográficas ou pontos de referências para assentamentos);
- deslocamentos horizontais quer do maciço quer das estruturas de contenção (inclinómetros e secções de convergência);
- variações da posição do nível freático no maciço (piezómetros de tubo aberto);
- variações da pressão intersticial no maciço nas camadas mais permeáveis (piezómetros de corda vibrante);
- deformações verticais e horizontais do maciço em profundidade (incret).

6.2. Trabalhos na zona B (eixos 1 a 4):

Os problemas mais delicados desta zona, foram os seguinte:

- execução do emboquilhamento entre a estação e o túnel já construído. A dificuldade era garantir a estanquidade durante a escavação, sendo o acesso para tratamento do solo sob a galeria existente dificultado pela presença desta;
- nesta zona encontrava-se o escudo enterrado a cerca de 10m.

A solução de “jet-grouting” do projecto previa a execução de colunas verticais e inclinadas, sob o escudo, complementados por injecções a partir do túnel. Os reforços internos dos anéis seriam constituídos por uma estrutura metálica provisória.

Após os ensaios prévios de “jet-grouting”, concluiu-se que a realização das colunas inclinadas apresentava as seguintes dificuldades:

- desvio e formação das colunas;
- interferência com o exterior;
- prazo.

Estes factos, associados ao problema da execução das injeções pelo interior do túnel levou a que o Empreiteiro apresentasse para esta zona um projecto variante. Assim foi estudada uma solução que superava as dificuldades e que oferecia características de estanquidade da galeria, considerando somente a execução de “jet-grouting” vertical:

- Na zona da galeria, atravessando esta, até ao miocénico.
- Na zona eixo 1-4, execução de escora sob a laje de fundo lateralmente ao escudo.

A galeria foi preenchida com um "rolhão" de betão de baixas características mecânicas, com um comprimento de 10m, na zona em que a furação para o “jet-grouting” a atravessava (Figura 4).

Na galeria, as secções anexas ao "rolhão", foram reforçadas com escoramento metálico com o intuito de que os anéis mantivessem a sua forma inicial.

Os trabalhos do emboquilhamento, foram iniciados pela execução do “jet-grouting” sobre a galeria. Concluído este, foi iniciada a perfuração da galeria, a partir da superfície, para execução do “jet-grouting” sob o túnel.

No decorrer do “jet-grouting” sob o túnel verificou-se um fluxo anormal de água para dentro da galeria, na face nascente do "rolhão", numa junta de betonagem do "rolhão".

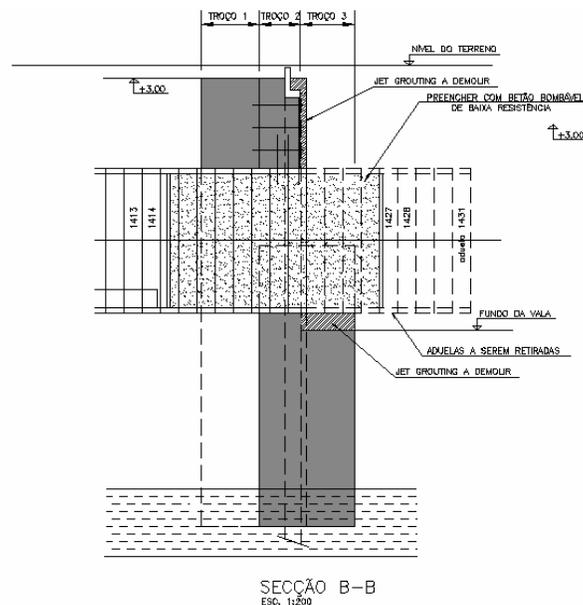


Figura 4 – Corte transversal pelo emboquilhamento.
Ligaçao entre o túnel existente e a estacão. Zona B

Concluiu-se que as juntas de betonagem do “rolhão” estavam sujeitas a uma elevada pressão hidrostática o que poderia levar à rotura do próprio “rolhão” e por consequência afectar toda a zona envolvente da estacão.

Para reduzir o risco da rotura do “rolhão” foram executadas 2 novas paredes em betão armado, uma em cada face do "rolhão". Nestas foram instaladas válvulas de pressão, que permitissem o alívio de pressões no interior do "rolhão".

O plano de instrumentação foi adaptado à nova situação, particularmente no interior da galeria, com a montagem de um sistema "on-line" de leitura de pressões no interior do "rolhão" e de deslocamento das suas faces.

O procedimento de execução do “jet-grouting” foi alterado:

1. execução de pré-corte com água.
2. execução de um pré-“jet-grouting” a cerca de 100 bares;
3. no início da presa das "pré-colunas" foram efectuadas as colunas definitivas a 400 bares.

Durante a execução do “jet-grouting” foram realizados furos de alívio, pelo menos 2 furos na envolvente de cada coluna, de modo a permitir um bom refluxo.

Foi implementada a leitura permanente de 2 extensómetros instalados na parte superior do revestimento da galeria, parando-se a injeção sempre que se verificava tendência de subida.

Apesar do controlo do refluxo do “jet-grouting”, verificou-se que a execução das colunas de “jet-grouting” sob a galeria, provocaram uma ligeira tendência de subida da galeria.

Estas medidas permitiram controlar o fluxo de água para o interior da galeria e a execução do emboquilhamento de forma controlada.

Concluído o emboquilhamento, foram efectuados ensaios de bombagem no seu interior, para verificação da sua estanquidade.

Os ensaios de estanquidade do emboquilhamento não foram conclusivos, pelo que se optou pela instalação de 4 furos de rebaixamento nas camadas localizadas superiormente à das Argilas do Forno Tijolo, no exterior do mesmo.

Verificou-se que o rebaixamento provocava assentamentos na superfície. Deste modo as bombas foram desligadas, tendo sido estabelecidos procedimentos que garantissem que seriam novamente ligadas, se se registassem entradas de água anormais. Tal facto nunca ocorreu.

Os restantes trabalhos, paredes moldadas, escavação, execução das estruturas da estação, ocorreram dentro dos pressupostos iniciais do projecto.

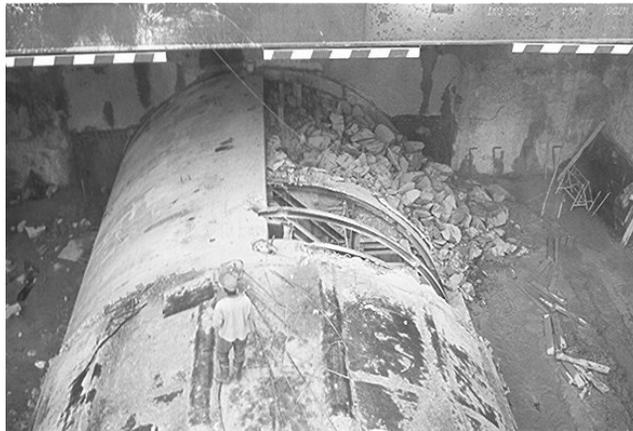


Figura 5 – Zona B. Desmontagem das aduelas.

6.3. Zona A (eixos 4 a 21):

Os principais problemas a controlar nesta zona da obra, consistiram no controlo de água no fundo da escavação e na salvaguarda da zona envolvente dos trabalhos:

- Na zona norte, o edifício da estação da REFER, a cerca de 7m da escavação;
- Na zona sul, o arruamento existente a cerca de 2m das paredes moldadas.

No decorrer da execução das paredes moldadas, do “jet-grouting” na soleira, e da execução da 1ª fase de escavação, até ao nível do escoramento, verificou-se que as leituras da instrumentação ocorreram dentro dos limites previstos no projecto.

Na 2ª fase de escavação, abaixo do escoramento e durante a execução de furo sob a camada de argila verificou-se que o caudal afluyente era maior do que era expectável, considerou-se assim que a permeabilidade relativa entre as duas camadas era significativamente diferente

Deste facto resultou preocupação com a estabilidade da camada argilosa e por consequência a possibilidade de existir um colapso por rotura de fundo.

Foram efectuadas novas análises para verificar a estabilidade dessa camada de argila face aos níveis de artesianismo detectados, por forma a permitir controlar o avanço da escavação até às cotas finais de projecto, sem riscos de instabilização.

Nesta verificação da rotura de fundo considerou-se somente o peso do solo como elementos resistente e equilibrante das pressões hidrostáticas verificadas.

Foram reavaliados ao longo da estação os elementos mais significativos, no que concerne aos parâmetros responsáveis pela estabilidade da escavação, a saber:

- cotas do fundo da escavação;
- distribuição espacial das Argilas do Forno do Tijolo, onde estão fundadas as paredes moldadas;
- dos níveis piezométricos sob a argila;
- espessura da laje de “jet-grouting”;

Estes estudos identificaram que, pontualmente, existiriam coeficientes de segurança inferiores à unidade, tendo sido necessário reduzir e controlar as pressões piezométricas sob a argila, por forma a que fossem respeitados os factores de segurança mínimos (superiores a 1,10).

Para reduzir a pressão hidrostática sob a camada de argila foram instalados dois poços de bombagem, ao longo da parede norte da estação, com câmara drenante na camada mais permeável situada entre a camada superior de argila acinzentada e a camada inferior de argila acastanhada.

Para monitorizar a eficácia dos poços de bombagem durante a operação de rebaixamento foram instalados 6 piezómetros com tubo aberto, na zona imediatamente abaixo das Argilas do Forno do Tijolo.

Foi portanto possível avaliar a eficiência da solução no que se refere à capacidade de alívio das pressões hidrostáticas, bem como a extensão dos efeitos. A operação foi efectuada com uma e duas bombas em funcionamento tendo-se registado, em qualquer dos casos, os caudais de bombagem.

Pode concluir-se, função da análise dos resultados expostos que:

- O impacto do funcionamento das bombas na cota dos níveis de água registados nos piezómetros apresentava-se bastante rápido, o que denotava estarmos em presença de um meio significativamente permeável;
- O raio de afluência dos poços de bombagem era bastante grande, uma vez que instalados entre os eixos 2 e 4 conseguiam baixar o nível piezométrico 1.0m no eixo 19 e 1.8m no eixo 9;
- O funcionamento dos poços provocou também um abaixamento do nível piezométrico no piezómetro, instalado junto à parede sul da estação, de cerca 2,3 m;
- Verificou-se uma recuperação relativamente bastante rápida (1 a 3 horas), das cotas iniciais dos níveis piezométricos, após desligada a última bomba.

Pelo exposto concluiu-se que a solução adoptada foi eficiente. Como se verificou que a recuperação era rápida houve a necessidade de possuir equipamento de reserva para o caso de avaria, garantir a substituição das bombas em menos de 2 horas.

Estas medidas permitiram executar toda a escavação e betonagem da laje de fundo em segurança, com o controlo da pressão hidrostática sob a escavação, sem interferência no prazo final da obra.

As leituras de instrumentação durante a execução da escavação e da estrutura, não atingiram os critérios de alerta, pelo que não foram necessárias outras alterações ao projecto (Figuras 6, 7 e 8).



Figura 6 – Zona A. Escavação dentro da estação. Paredes moldadas e Escoramentos



Figura 7 – Vista do interior da galeria para a Zona do eixo 1 a 4. Zona do “rolhão”



Figura 8 – Escavação da zona do eixo 4 a 21, abaixo dos escoramentos metálicos.

7. 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.