

ACOMPANHAMENTO E OBSERVAÇÃO DA ESTAÇÃO QUINTA DAS MOURAS – METROPOLITANO DE LISBOA

João Mateus da Silva, João Portugal e Luís Ribeiro e Sousa
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia, Lisboa, Portugal

Joaquim Barreto
Metropolitano de Lisboa, Lisboa, Portugal

Álvaro Igreja, André Lopes e Ricardo Sousa
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

RESUMO: O prolongamento da Linha Amarela entre o Campo Grande e Odivelas tem uma extensão de cerca de 5km, incluindo cinco novas estações. A estação Quinta das Mouras situa-se sob o alargamento correspondente à Rua Luís Pastor de Macedo. É materializada por dois poços, sendo escavada ao abrigo de contenção de estacas, com uma extensão do cais de cerca de 25m de comprimento e abertura máxima igual a 16m. A escavação efectuada compreendeu inicialmente a execução de um túnel por uma tuneladora Lovat. Refere-se, na comunicação, o Plano de observação, em que se procurou otimizar e compatibilizar as estruturas dos edifícios existentes e os espaços disponíveis, de modo a garantir condições de segurança da obra e das infra-estruturas vizinhas existentes, bem como as diferentes formações geotécnicas que ocorrem. Apresentam-se alguns resultados mais relevantes da monitoração da estação, bem como resultados obtidos por modelos numéricos.

1 INTRODUÇÃO

O prolongamento da Linha Amarela entre o Campo Grande e Odivelas tem uma extensão de cerca de 5km, incluindo cinco novas estações (Quinta das Mouras, Lumiar, Ameixoeira, Senhor Roubado e Odivelas), cerca de 2,7km de túnel construído com uma máquina TBM EBS, dois túneis construídos segundo o designado método NATM com cerca de 0,8km de comprimento, dois viadutos com a extensão aproximada de 1,1km e um túnel terminal em Odivelas (Figura 1).

A Estação Quinta das Mouras situa-se sob o alargamento correspondente à Rua Luís Pastor de Macedo. Tem uma estrutura especial de cais laterais, sendo os acessos à superfície na Rua Tobis Portuguesa e na Rua Luís Pastor de Macedo. A Estação é materializada por dois poços, sendo escavada ao abrigo de contenção de estacas, com uma extensão do cais de cerca de 25m de comprimento e abertura máxima igual a 16m. A escavação efectuada compreendeu inicialmente a execução de um túnel por uma tuneladora Lovat, modelo ME 386 SE.

Nesta comunicação, refere-se o Plano de instrumentação e de observação da Estação, em que se procurou otimizar e compatibilizar as estruturas dos edifícios existentes e os espaços disponíveis, de modo a garantir condições de segurança da obra e das infra-estruturas vizinhas existentes, bem como as diferentes formações geotécnicas que ocorrem, constituídas por camadas de Areias da Quinta do Bacalhau, que estão recobertas por formações recentes

tipo aluvionar constituídas por areias finas a muito finas, por vezes argilosas.

Apresentam-se alguns resultados mais relevantes da monitoração da estação, bem como alguns resultados obtidos por recurso a modelos numéricos planos por elementos finitos, utilizando parâmetros geotécnicos utilizados no projecto e que permitiram estimar valores aproximados de previsão de deslocamentos e esforços.

2 ESTAÇÃO QUINTA DAS MOURAS

2.1 Generalidades

A Estação Quinta das Mouras situa-se sob o alargamento correspondente à Rua Luís Pastor de Macedo. Terá uma estrutura especial de cais laterais, sendo os acessos à superfície na Rua Tobis Portuguesa e na Rua Luís Pastor de Macedo (Figura 2). Esta Estação foi materializada por dois poços, sendo escavada ao abrigo de contenção periférica de paredes moldadas de 0,80m de espessura, com uma extensão do cais de cerca de 25m de comprimento e abertura máxima igual a 16m (Melâneo, 2001).

A sequência construtiva adoptada foi processada do seguinte modo (Figura 3):

- Execução de paredes moldadas
- Passagem da tuneladora
- Reforço do túnel com estrutura metálica
- Execução da escavação, com contenções periféricas provisórias, para atingir o nível inferior da laje de cobertura

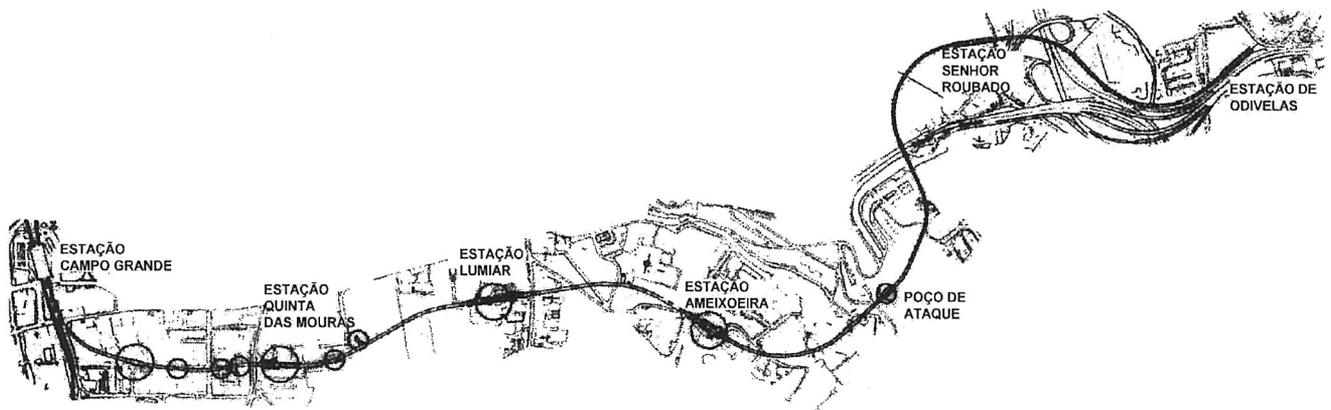


Figura 1. Extensão da Linha Amarela do Metropolitano de Lisboa (Melâneo et al., 2003)

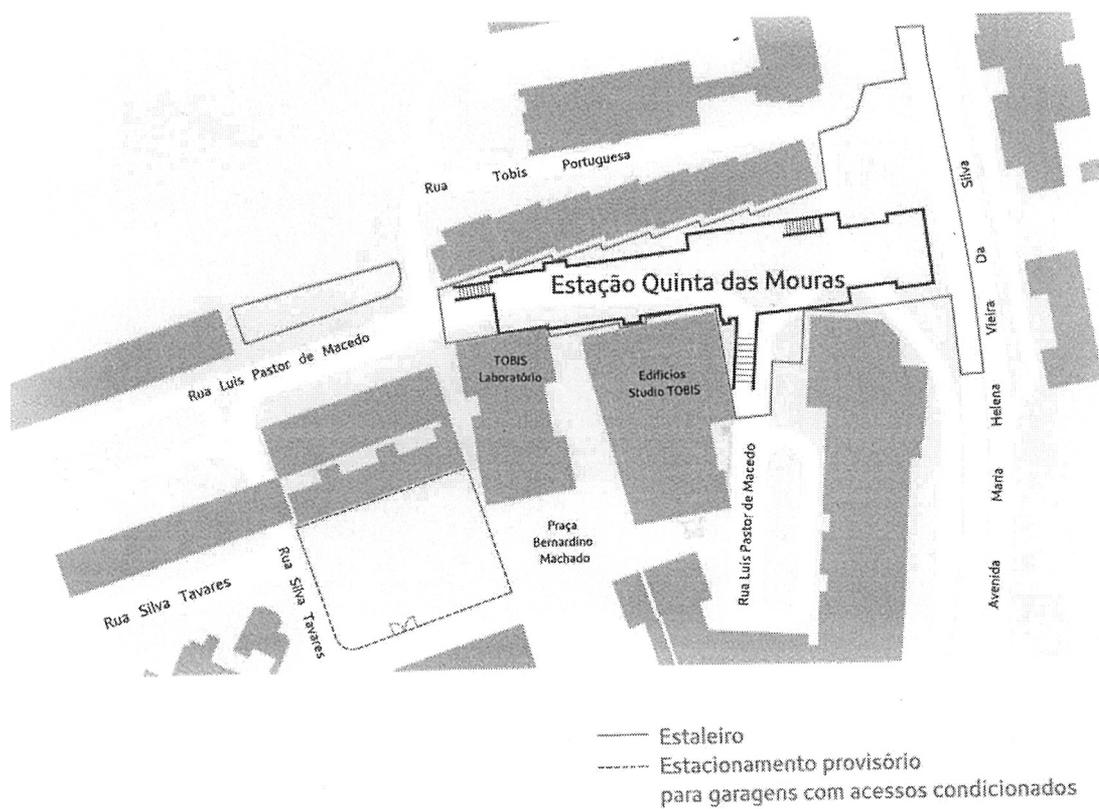


Figura 2. Estação Quinta das Mouras

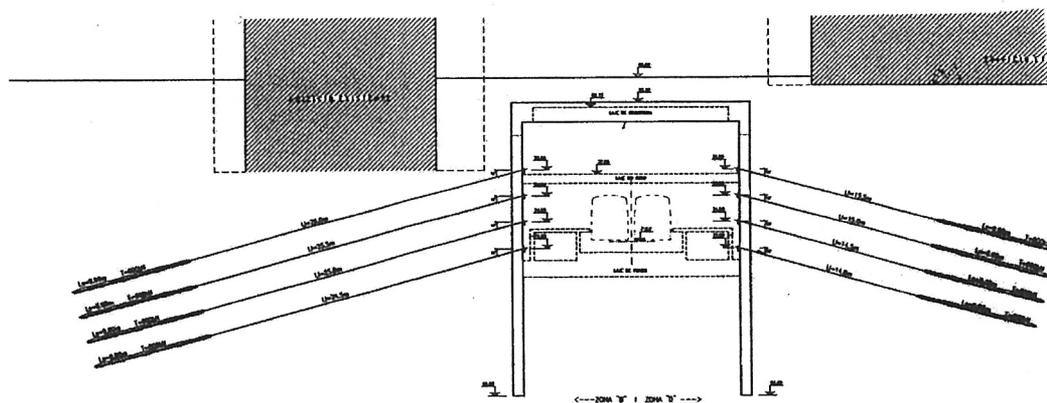


Figura 3. Faseamento construtivo da estação para uma secção tipo

- Execução da laje de cobertura, reaterro e reposição da circulação à superfície
- Execução dos diferentes níveis de ancoragens
- Execução das lajes de fundo e restantes níveis interiores
- Desactivação das ancoragens provisórias.

Nas situações em que ocorrem aberturas na laje de cobertura (caso de escadas e poços de ventilação) foram colocados escoramentos a este nível durante a fase construtiva.

Junto ao topo sul da estação foi prevista uma abertura para remoção dos solos escavados e acesso ao interior, pelo que o processo construtivo foi o tradicional de escavação faseada desde a superfície até ao fundo com aplicação dos vários níveis de ancoragem previstos.

Na zona de passagem da tuneladora as paredes moldadas foram protegidas por coluna de “Jet Grouting” a executar no tardoz.

Nas Figuras 4 e 5 ilustram-se fotograficamente aspectos da construção da estação.



Figura 4. Execução de laje superior

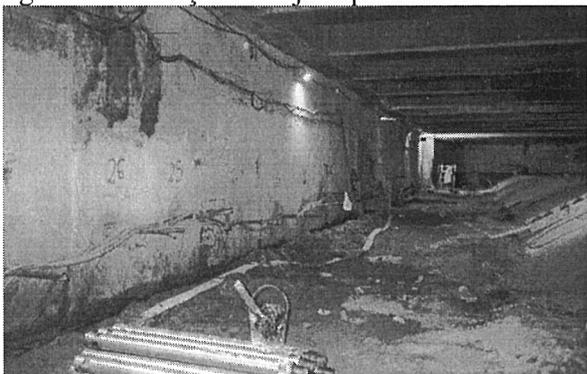


Figura 5. Execução de escavações no interior

2.2 Características dos elementos de suporte e acções

Existem três tipos de elementos de suporte: i) as paredes moldadas e as vigas de piso, executadas

em betão armado; ii) as aduelas colocadas pela tuneladora, também em betão armado; e iii) as ancoragens provisórias.

As paredes moldadas em betão armado, têm a espessura de 0,80m. As características adoptadas para o betão armado das paredes moldadas e vigas de piso são apresentadas de seguida: peso volúmico - 24 kN/m³; módulo de elasticidade - 30 GPa; coeficiente de Poisson - 0,25; e tensão de tracção 2,9 MPa.

As aduelas, colocadas pela tuneladora durante a escavação do tunnel, têm as seguintes características: peso volúmico - 24 kN/m³; módulo de elasticidade - 35 GPa; coeficiente de Poisson 0,25; e espessura de 0,3m.

As ancoragens colocadas provisoriamente para a realização da escavação são de dois tipos (Ancoragem600 e Ancoragem800), apresentando no entanto características iguais que se resumem em seguida: diâmetro dos cabos - 15mm; número de cabos - 3 unidades; módulo de elasticidade do aço de 200 GPa; espaçamento longitudinal de 2,0m e comprimento dos bolbos de selagem 9,0m. A diferença entre os dois tipos de ancoragem consiste no valor do pré-esforço, que no caso da Ancoragem600 é de 600kN e no caso da Ancoragem800 é de 800kN.

No que respeita às acções, os edifícios existentes na vizinhança da estação de metropolitano em estudo, particularmente os que se desenvolvem ao longo da secção em análise, transmitem ao terreno uma carga que se admite uniformemente distribuída. Admitiu-se que os edifícios têm 8 pisos e que sustentam uma carga de 10kN/m² a actuar nas lajes de piso. Assim sendo, pode dizer-se que a carga linear aplicada numa secção em estudo é de 80kN/m. Para a sobrecarga correspondente à circulação na rua sobre a estação adoptou-se o valor de 10kPa, ou seja, no modelo em estudo, tal acção traduz-se por uma carga linear de 10kN/m.

3 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Refere-se que, no local da estação, ocorrem formações da idade miocénica constituídas por camadas de *Areias da Quinta do Bacalhau* (M²_{IVb}), que estão recobertas por formações recentes tipo aluvionar constituídas por areias finas a muito finas, por vezes argilosas.

Os solos no local de implantação da obra caracterizam-se pela ocorrência de um depósito superficial (C1) com cerca de 1,0m de espessura, seguida de uma camada de depósitos aluvionares (C2A), com cerca de 7,0m de espessura que assenta num substrato (C4) designado por “areias da Quinta do Bacalhau” de idade Miocénica.

O nível freático foi detectado 11,0m abaixo do topo da laje de cobertura, ou seja, à cota 76,0m. No entanto, uma vez que a escavação foi drenada, con-

sidera-se neste estudo o nível freático à cota 61,0m (cota da soleira da laje de fundo).

Os parâmetros de resistência adoptados para as camadas em presença são os abaixo indicados (Quadro 1).

Quadro 1. Parâmetros geomecânicos adoptados no projecto

Material	C2A	C4
c' (kPa)	0,0	10,0
ϕ' (°)	30,0	32,0
E (MPa)	18,0	60,0
γ (kN/m ³)	20,0	20,0

4 SISTEMA DE OBSERVAÇÃO

O Plano de Instrumentação e de Observação da estação foi estabelecido tendo em vista procurar otimizar e compatibilizar as estruturas dos edifícios existentes e os espaços disponíveis, de modo a garantir condições de segurança da obra e das infra-estruturas vizinhas existentes (Figura 6).

Instalaram-se os seguintes aparelhos ou dispositivos de leitura:

- Alvos fixos e de nivelamento em edifícios existentes na periferia da Estação para medição de deslocamentos em três direcções e de assentamentos.
- Inclínómetros para medição de deslocamentos horizontais no interior do maciço.
- Piezómetros do tipo Casagrande para medição de níveis freáticos.

O Plano estabelecia os objectivos primordiais das actividades de observação durante a fase de construção. Tais objectivos podem ser divididos em duas categorias:

- Os relacionados com a segurança da obra.
- Os que visam o melhorar do conhecimento do comportamento dos terrenos e permitem adaptar os processos construtivos.

O Plano de Observação e instrumentação da Estação descrevia, ainda, de forma sucinta o processo construtivo da Estação e a frequência de leituras que seriam, em princípio, em função dos resultados e do estágio da obra. Foi estabelecida a periodicidade que se indica no Quadro 2. Os valores preconizados eram adequados para a situação da estação.

No que respeita a níveis de alerta, foram considerados três níveis de alerta (verde, amarelo e vermelho), tendo em consideração a proporção do deslocamento horizontal acumulado (Δh) com a altura escavada (H) e a taxa de progressão diária (taxa):

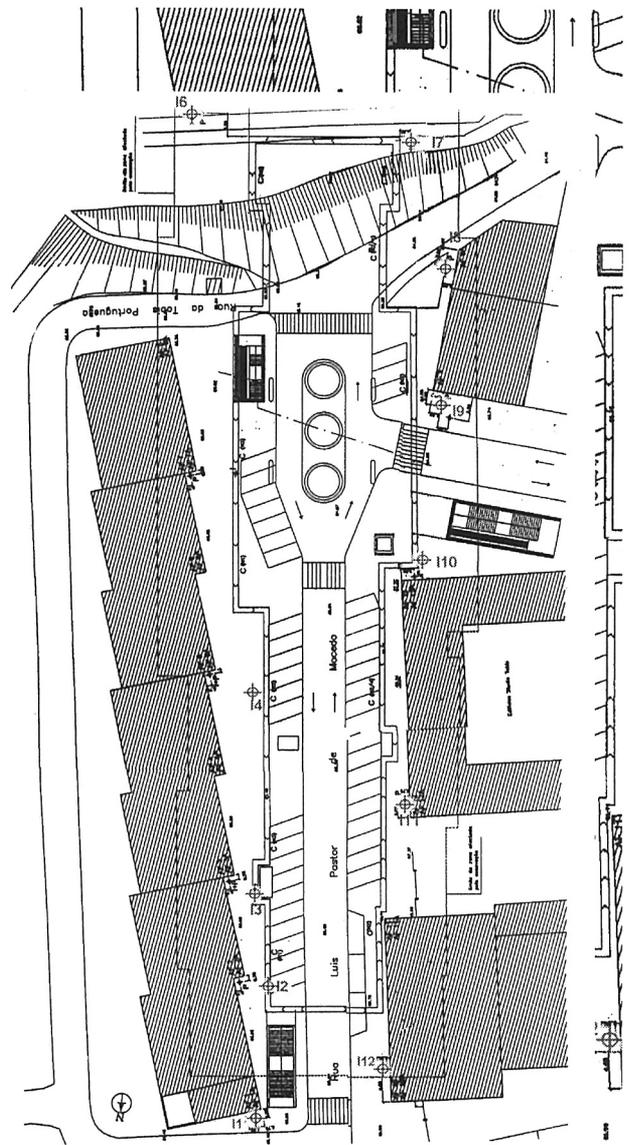


Figura 6. Plano de instrumentação

Quadro 2. Periodicidade de leituras de observação na Estação Quinta das Mouras

Equipamento de observação	Periodicidade		
	Durante as obras	Dois anos iniciais	Após dois anos
Alvos e marcas	bisemanal	Mensal	Semestral
Inclínómetros	Semanal	Mensal	Semestral
Piezómetros	Semanal	Mensal	Semestral

- Verde* – Consideram-se sensivelmente estabilizadas as deformações, o que acontece quando $\Delta h \leq 0,1H\%$ e taxa $\leq 0,15\text{mm/dia}$. As medidas recomendadas consistem em continuar a utilizar o método construtivo indicado no projecto.
- Amarelo* - Consideram-se no limite da estabilização das deformações, o que acontece quando $\Delta h \leq 0,2H\%$ e taxa $\leq 0,3\text{mm/dia}$. As medidas recomendadas consistem em analisar cuidadosamente as leituras dos aparelhos; em efectuar uma análise crítica do processo construtivo e re-

formular eventualmente o mesmo de modo a diminuir a taxa de deformação.

iii) *Vermelho* – Consideram-se instabilizadas as deformações. Deve-se agir de imediato segundo as indicações do projectista e efectuar leituras espaçadas de 4 em 4 horas. Este nível de alerta ocorre quando $\Delta h \leq 0,3H\%$ e taxa $\leq 0,45\text{mm}/\text{dia}$.

Na Figura 7, apresentam-se alguns resultados de observação do inclinómetro I9 na direcção do eixo A. A localização do inclinómetro e da direcção do eixo A está, também, indicada na Figura 6.

Junto ao edifício Tóbis, os resultados do correspondente inclinómetro mais próximo indicaram observações anómalas, pelo que foram conduzidas prospecções com georadar no maciço terroso entre a parede moldada e o edifício. Os resultados permitiram localizar tubagens no maciço e várias anomalias que não foi possível identificar. Na Figura 8, ilustra-se uma imagem obtida com o georadar, com escala de profundidades estimadas em metros para um valor admitido para a constante dieléctrica de 10 ($V=0,095\text{ m/ns}$), (areias argilosas). Foi efectuada a prospecção com um georadar da marca GSSI (USA), tendo sido utilizadas duas antenas com frequências principais de 500 e 900 MHz (Oliveira e Sousa, 2003).

5 MODELAÇÃO NUMÉRICA

Foi feita a análise estrutural de uma secção tipo, em que o faseamento construtivo assume uma importância vital, podendo contribuir decisivamente para a sua estabilidade. Foi utilizado o *software* Phase 2 por elementos finitos, da Universidade de Toronto, considerando os parâmetros geomecânicos e características dos materiais e das acções anteriormente referidas. Cada cálculo apresentava um número importante de fases, que se procuram sintetizar nas Figuras 9 a 13, onde se representam detalhes de algumas malhas de cálculo.

A Figura 14 evidencia deslocamentos horizontais da parede moldada que se encontra à direita, calculados em relação à fase1 (inicial). Os maiores deslocamentos verificam-se na fase16, na parte superior da parede, e são da ordem dos 6,5mm. A interpretação de resultados é idêntica à apresentada para a cortina do lado esquerdo, com uma diferença: na fase19 a estação sofre uma translação para a direita, e assim sendo a parede moldada desloca-se no mesmo sentido.

Foi possível constatar que estes valores numéricos dos deslocamentos horizontais se situam dentro da ordem de grandeza dos valores observados por inclinómetros.

A distribuição de zonas em cedência no maciço, ao longo do processo construtivo, é apresentada de seguida nas Figuras 15 a 19, para algumas das fases construtivas mais significativas. A escavação

do túnel TBM foi feita considerando um coeficiente de desconfinamento de 20% obtido na estação Lumiar do Metropolitano de Lisboa, para condições geomecânicas similares e utilizando uma metodologia descrita na publicação de Vieira et al. (2002).

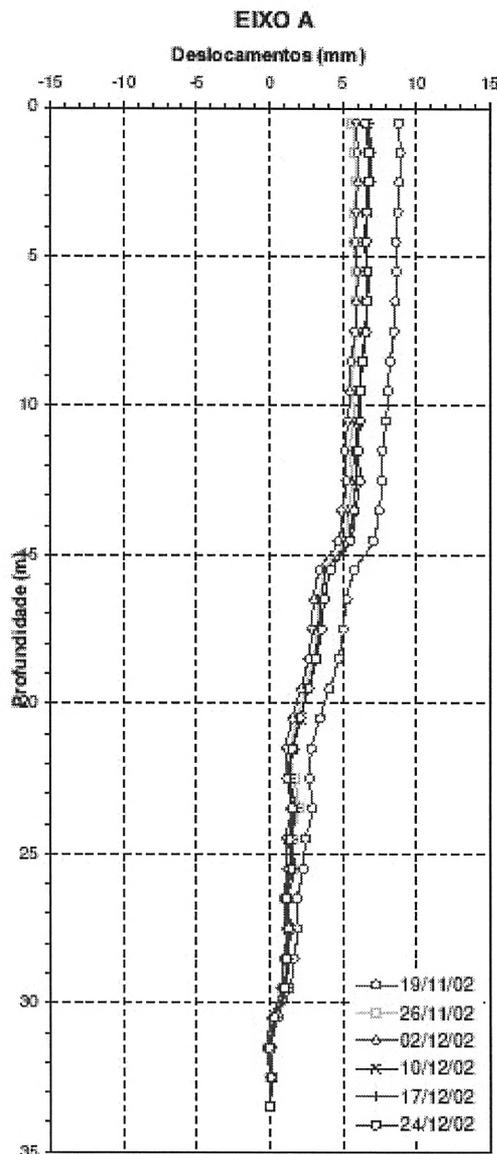


Figura 7. Deslocamentos horizontais obtidos com inclinómetro I9

Na fase 3, com a escavação do túnel, os pontos mais superficiais do maciço entram em rotura. No entanto, esta zona em rotura é também muito localizada (entre paredes moldadas) e de pequena espessura, não sendo por isso crítica. Com o início da escavação no interior da estação (fase 9), os pontos na vizinhança do túnel entram em rotura. Este fenómeno fica confinado ao interior da estação, numa zona que vai ser escavada posteriormente. Uma vez que o túnel se encontra suportado no interior e que a zona mais instável se situa entre as pa-

redes moldadas, a situação não pôs em risco a segurança da obra.

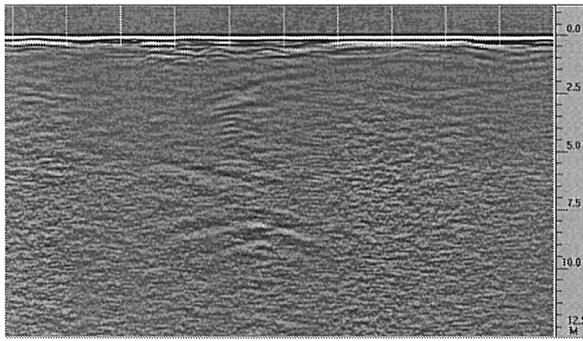


Figura 8. Imagem obtida com georadar

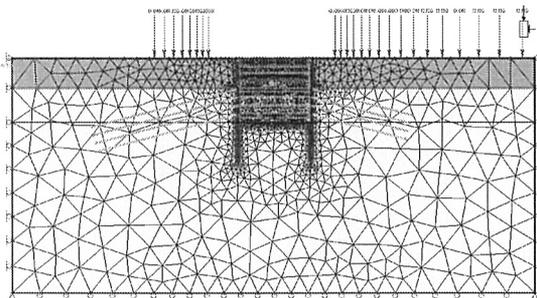


Figura 9. Execução das paredes moldadas de 0,8m, fase 1

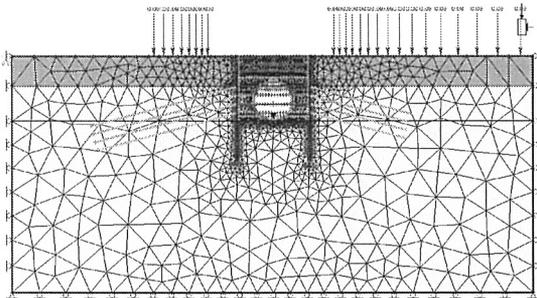


Figura 10. Passagem da tuneladora, com libertação de 20% das tensões do maciço antes da colocação das aduelas de betão, fase 2.

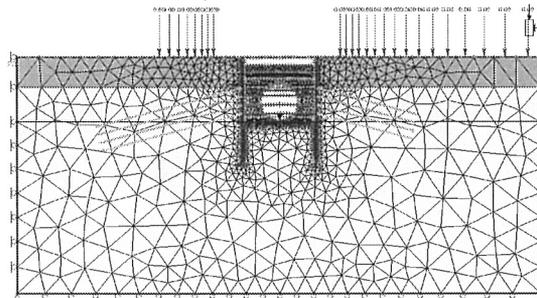


Figura 11. Início da escavação e execução da laje de cobertura com 1,5m de espessura, fase 6.

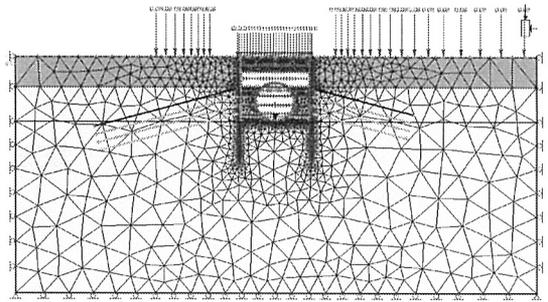


Figura 12. Execução do primeiro nível de ancoragens, fase 10.

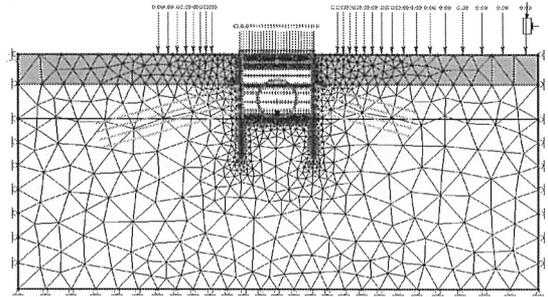


Figura 13. Desactivação das ancoragens, fase 19.

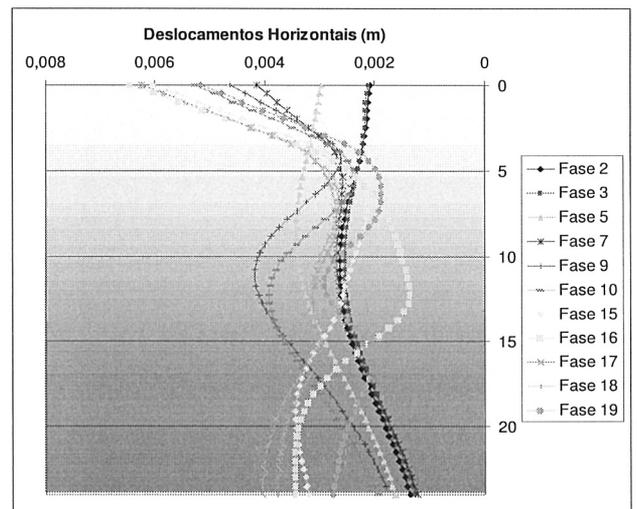


Figura 14. Deslocamento horizontais na parede moldada à direita.

A introdução das ancoragens aumenta o factor de resistência nas proximidades destes elementos de suporte, como acontece na fase 10. A introdução do ultimo nível de ancoragens (fase 16) aumenta o factor de segurança nas proximidades destes elementos de suporte. Finalmente, a remoção das ancoragens implica uma diminuição do factor de segurança sobretudo nas faces exteriores das paredes moldadas. No entanto, este parâmetro mantém-se ainda bastante superior a 1 na maior parte do maciço. As zonas em que tal não acontece são zonas na vizinhança de elementos de suporte, pelo que a segurança da obra estava verificada.

Apresentam-se, ainda, alguns resultados relativos a esforços nas paredes moldadas utilizando elementos lineares desenvolvidos numa outra malha de elementos finitos similares (Figuras 19 a 23). Na fase 3, as paredes moldadas são pouco solicitadas uma vez que os esforços provenientes da remoção do terreno são imediatamente suportados pelas aduelas de betão, visto que estas são colocadas instantaneamente com a escavação. Na fase 9, verifica-se o valor máximo do momento-flector ao qual as paredes moldadas estão solicitadas (1083 kN.m). A introdução do primeiro nível de ancoragens (fase 9) reduz significativamente o valor dos momentos-flectores. Este facto é explicado pela introdução de uma nova zona de apoio nas paredes e, consequentemente, redistribuição destes esforços. A fase 10, com introdução do primeiro nível de ancoragens, reduz significativamente o valor dos momentos flectores. Este facto é, também, explicado pela introdução de uma nova zona de apoio nas paredes e, consequentemente, redistribuição destes esforços na fase 16, a introdução do último nível de ancoragens tem um efeito semelhante ao descrito na fase 10. Neste caso a diminuição atinge valores da ordem de 300 KN.m. A desactivação das ancoragens implica um pequeno ajuste na distribuição dos momentos flectores por novas zonas de apoio (laje do fundo e intermédia), (Fase 19).

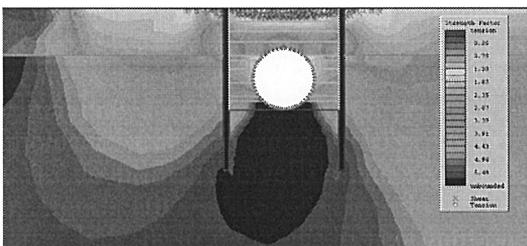


Figura 15. Zonas de cedência para fase 3 (passagem da tuneladora e libertação de 20%)

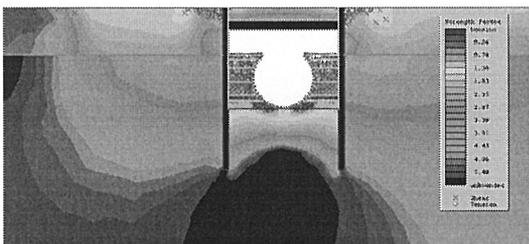


Figura 16. Zonas de cedência para a fase 9 (com escavação no interior da estação)

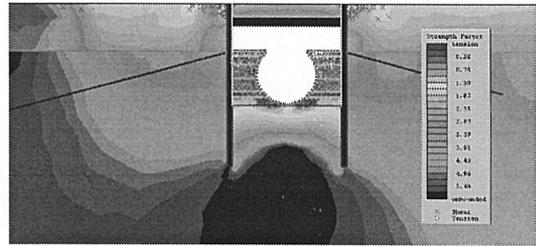


Figura 17. Zonas de cedência para a fase 10 (com introdução do primeiro nível de ancoragens)

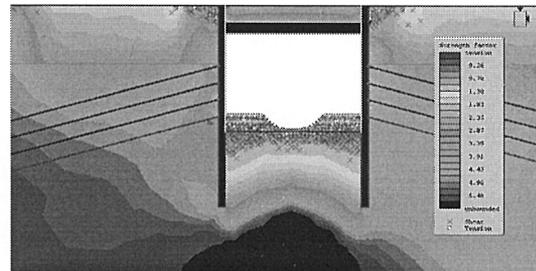


Figura 18. Zonas de cedência para a fase 16 (introdução do último nível de ancoragens)

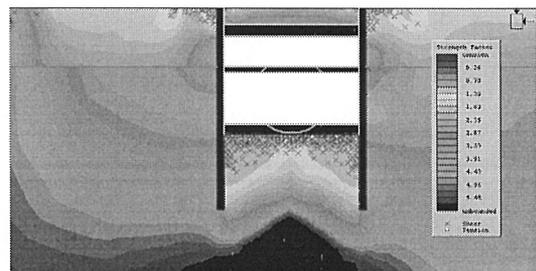


Figura 19. Zonas de roturas para a fase 19 (desactivação de ancoragens)

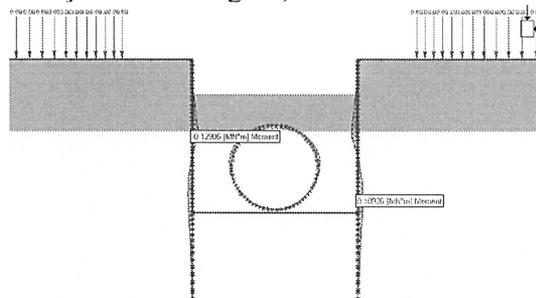


Figura 20. Momentos flectores na fase 5 (introdução das aduelas no túnel TBM)

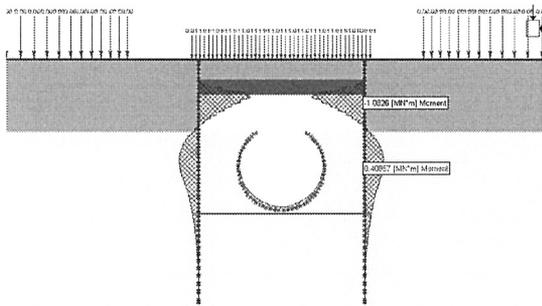


Figura 21. Momentos flectores na fase 9 (com escavação no interior)

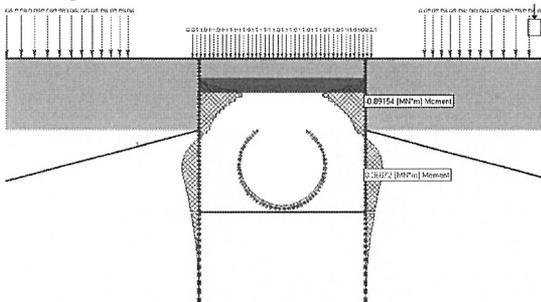


Figura 22. Momentos flectores na fase 10 (introdução do primeiro nível de ancoragens)

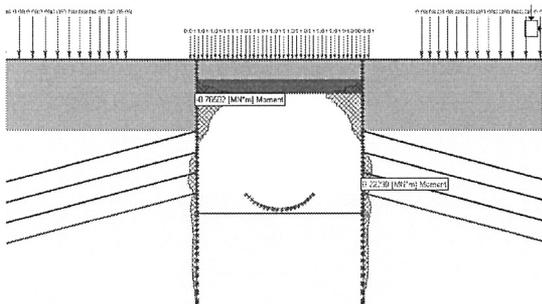


Figura 23. Momentos flectores na fase 16 (introdução do último nível de ancoragens)

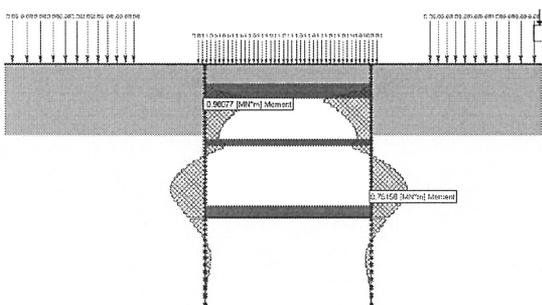


Figura 24. Momentos flectores na fase 19 (desactivação das ancoragens)

6 CONCLUSÃO

Apresenta-se um caso prático de uma estação da Linha Amarela do Metropolitano de Lisboa, praticamente concluída, em formações sedimentares típicas da região de Lisboa e de fracas características geomecânicas. Tem importantes condicionantes no que respeita às edificações envolventes.

Foi implementado um sistema de observação rigoroso, que permitiu, para as diferentes fases da vida da obra, garantir a monitorização da segurança.

Complementou-se com um extenso volume de cálculos numéricos para aferir os valores observados.

AGRADECIMENTO

Ao Metropolitano de Lisboa agradece-se pela possibilidade de incluir informação respeitante à Estação Quinta das Mouras.

O trabalho foi efectuado no âmbito de um projecto do Programa POCTI intitulado *Concepção, Projecto e Reabilitação de Túneis em Obras Viárias*.

REFERÊNCIAS

- Melâneo, F. 2001. Prolongamento da Linha Amarela do Metropolitano de Lisboa. O projecto, as obras e a minoração das interferências à superfície. Curso Sobre Túneis em Meios Urbanos, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Coimbra: 14.
- Melâneo, F.; R.L. Sousa, C. Jorge 2003. Prolongamento da Linha Amarela do Metropolitano de Lisboa entre o Campo Grande e Odivelas. Término de Odivelas. Jornadas Luso-Espanholas sobre Relevância da Prospecção e Observação Geotécnicas nas Obras Subterrâneas, Madrid.
- Oliveira, M.; Sousa, L.R. 2003. Inspecção por georadar do túnel do Meão. LNEC, Relatório, Lisboa: 86.
- Sousa, L.R.; J.M. Silva; N. Leitão; J. Portugal; A. Vieira 2001. Acompanhamento das obras de expansão do Metropolitano de Lisboa. Linha Campo Grande – Odivelas. LNEC, 1º Relatório, Lisboa.
- Vieira, A.; J.M. Silva; J. Barreto, L.R. Sousa 2002. Análise numérica do comportamento de estruturas na estação do Lumiar do Metropolitano de Lisboa. 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa: 2665-2679.

ACOMPANHAMENTO E OBSERVAÇÃO DA ESTAÇÃO QUINTA DAS MOURAS – METROPOLITANO DE LISBOA

João Mateus da Silva, João Portugal e Luís Ribeiro e Sousa
LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia, Lisboa, Portugal

Joaquim Barreto
Metropolitano de Lisboa, Lisboa, Portugal

Álvaro Igreja, André Lopes e Ricardo Sousa
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal

RESUMO: O prolongamento da Linha Amarela entre o Campo Grande e Odivelas tem uma extensão de cerca de 5km, incluindo cinco novas estações. A estação Quinta das Mouras situa-se sob o alargamento correspondente à Rua Luís Pastor de Macedo. É materializada por dois poços, sendo escavada ao abrigo de contenção de estacas, com uma extensão do cais de cerca de 25m de comprimento e abertura máxima igual a 16m. A escavação efectuada compreendeu inicialmente a execução de um túnel por uma tuneladora Lovat. Refere-se, na comunicação, o Plano de observação, em que se procurou otimizar e compatibilizar as estruturas dos edifícios existentes e os espaços disponíveis, de modo a garantir condições de segurança da obra e das infra-estruturas vizinhas existentes, bem como as diferentes formações geotécnicas que ocorrem. Apresentam-se alguns resultados mais relevantes da monitoração da estação, bem como resultados obtidos por modelos numéricos.

1 INTRODUÇÃO

O prolongamento da Linha Amarela entre o Campo Grande e Odivelas tem uma extensão de cerca de 5km, incluindo cinco novas estações (Quinta das Mouras, Lumiar, Ameixoeira, Senhor Roubado e Odivelas), cerca de 2,7km de túnel construído com uma máquina TBM EBS, dois túneis construídos segundo o designado método NATM com cerca de 0,8km de comprimento, dois viadutos com a extensão aproximada de 1,1km e um túnel terminal em Odivelas (Figura 1).

A Estação Quinta das Mouras situa-se sob o alargamento correspondente à Rua Luís Pastor de Macedo. Tem uma estrutura especial de cais laterais, sendo os acessos à superfície na Rua Tobis Portuguesa e na Rua Luís Pastor de Macedo. A Estação é materializada por dois poços, sendo escavada ao abrigo de contenção de estacas, com uma extensão do cais de cerca de 25m de comprimento e abertura máxima igual a 16m. A escavação efectuada compreendeu inicialmente a execução de um túnel por uma tuneladora Lovat, modelo ME 386 SE.

Nesta comunicação, refere-se o Plano de instrumentação e de observação da Estação, em que se procurou otimizar e compatibilizar as estruturas dos edifícios existentes e os espaços disponíveis, de modo a garantir condições de segurança da obra e das infra-estruturas vizinhas existentes, bem como as diferentes formações geotécnicas que ocorrem, constituídas por camadas de Areias da Quinta do Bacalhau, que estão recobertas por formações recentes

tipo aluvionar constituídas por areias finas a muito finas, por vezes argilosas.

Apresentam-se alguns resultados mais relevantes da monitoração da estação, bem como alguns resultados obtidos por recurso a modelos numéricos planos por elementos finitos, utilizando parâmetros geotécnicos utilizados no projecto e que permitiram estimar valores aproximados de previsão de deslocamentos e esforços.

2 ESTAÇÃO QUINTA DAS MOURAS

2.1 Generalidades

A Estação Quinta das Mouras situa-se sob o alargamento correspondente à Rua Luís Pastor de Macedo. Terá uma estrutura especial de cais laterais, sendo os acessos à superfície na Rua Tobis Portuguesa e na Rua Luís Pastor de Macedo (Figura 2). Esta Estação foi materializada por dois poços, sendo escavada ao abrigo de contenção periférica de paredes moldadas de 0,80m de espessura, com uma extensão do cais de cerca de 25m de comprimento e abertura máxima igual a 16m (Melâneo, 2001).

A sequência construtiva adoptada foi processada do seguinte modo (Figura 3):

- Execução de paredes moldadas
- Passagem da tuneladora
- Reforço do túnel com estrutura metálica
- Execução da escavação, com contenções periféricas provisórias, para atingir o nível inferior da laje de cobertura

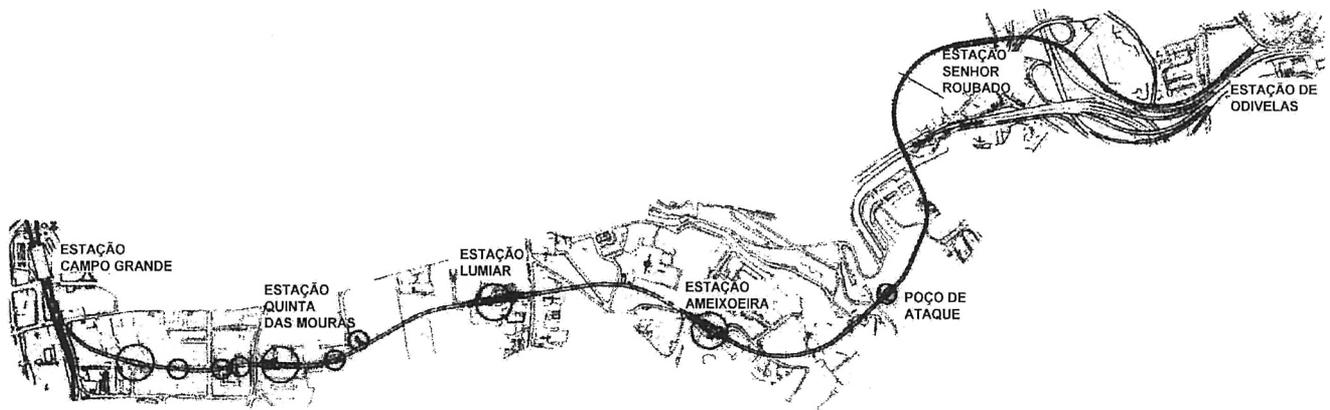


Figura 1. Extensão da Linha Amarela do Metropolitano de Lisboa (Melâneo et al., 2003)

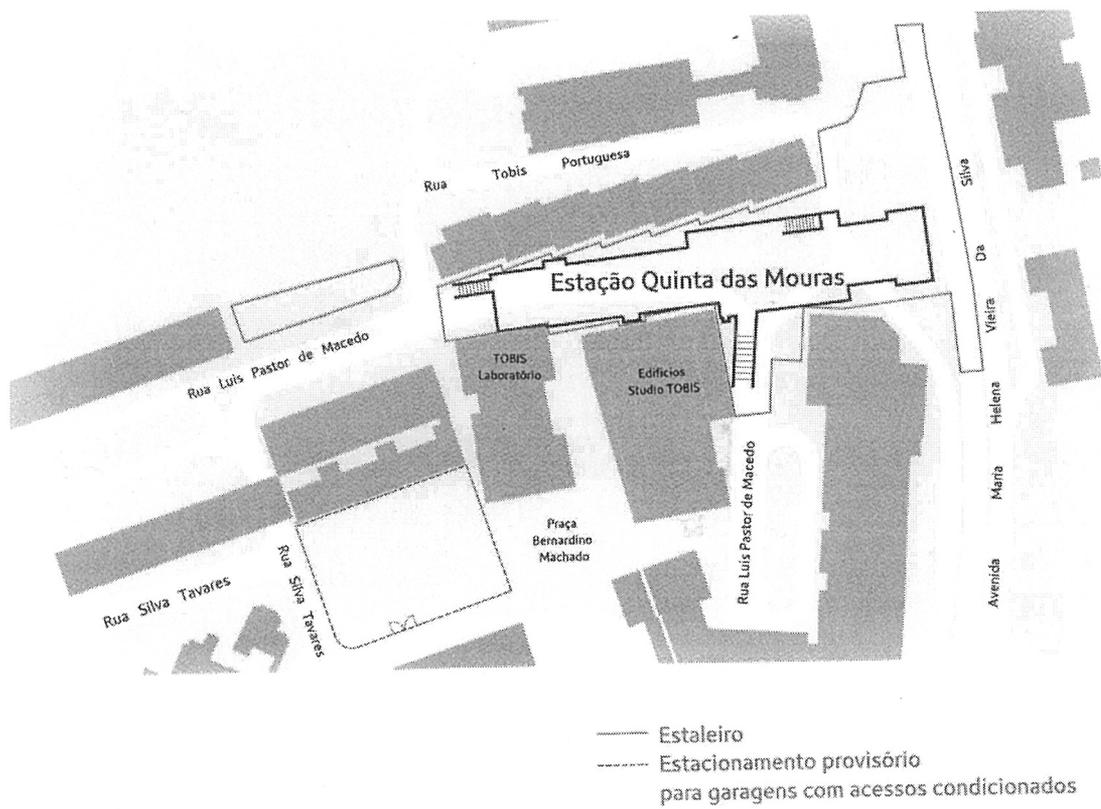


Figura 2. Estação Quinta das Mouras

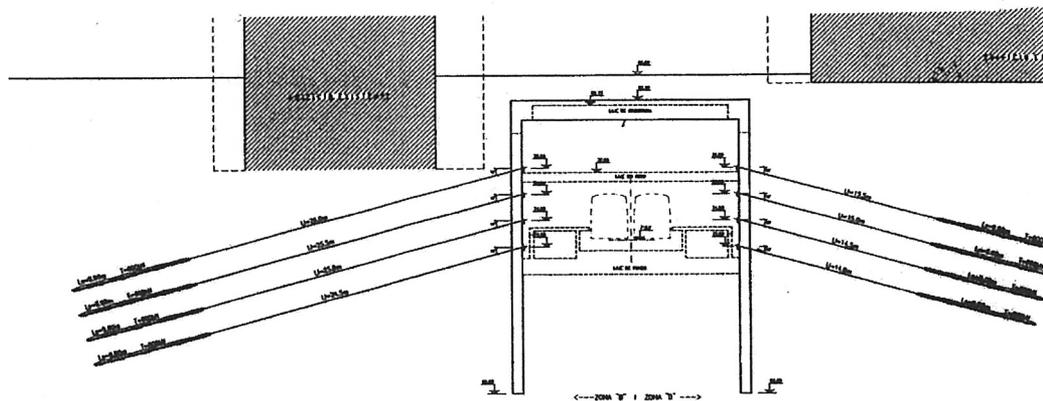


Figura 3. Faseamento construtivo da estação para uma secção tipo

- Execução da laje de cobertura, reaterro e reposição da circulação à superfície
- Execução dos diferentes níveis de ancoragens
- Execução das lajes de fundo e restantes níveis interiores
- Desactivação das ancoragens provisórias.

Nas situações em que ocorrem aberturas na laje de cobertura (caso de escadas e poços de ventilação) foram colocados escoramentos a este nível durante a fase construtiva.

Junto ao topo sul da estação foi prevista uma abertura para remoção dos solos escavados e acesso ao interior, pelo que o processo construtivo foi o tradicional de escavação faseada desde a superfície até ao fundo com aplicação dos vários níveis de ancoragem previstos.

Na zona de passagem da tuneladora as paredes moldadas foram protegidas por coluna de “Jet Grouting” a executar no tardoz.

Nas Figuras 4 e 5 ilustram-se fotograficamente aspectos da construção da estação.



Figura 4. Execução de laje superior

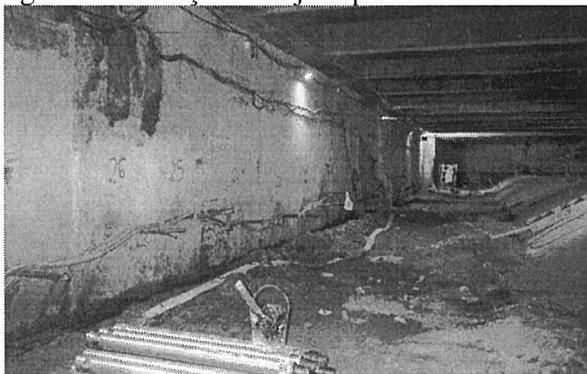


Figura 5. Execução de escavações no interior

2.2 Características dos elementos de suporte e acções

Existem três tipos de elementos de suporte: i) as paredes moldadas e as vigas de piso, executadas

em betão armado; ii) as aduelas colocadas pela tuneladora, também em betão armado; e iii) as ancoragens provisórias.

As paredes moldadas em betão armado, têm a espessura de 0,80m. As características adoptadas para o betão armado das paredes moldadas e vigas de piso são apresentadas de seguida: peso volúmico - 24 kN/m³; módulo de elasticidade - 30 GPa; coeficiente de Poisson - 0,25; e tensão de tracção 2,9 MPa.

As aduelas, colocadas pela tuneladora durante a escavação do tunnel, têm as seguintes características: peso volúmico - 24 kN/m³; módulo de elasticidade - 35 GPa; coeficiente de Poisson 0,25; e espessura de 0,3m.

As ancoragens colocadas provisoriamente para a realização da escavação são de dois tipos (Ancoragem600 e Ancoragem800), apresentando no entanto características iguais que se resumem em seguida: diâmetro dos cabos - 15mm; número de cabos - 3 unidades; módulo de elasticidade do aço de 200 GPa; espaçamento longitudinal de 2,0m e comprimento dos bolbos de selagem 9,0m. A diferença entre os dois tipos de ancoragem consiste no valor do pré-esforço, que no caso da Ancoragem600 é de 600kN e no caso da Ancoragem800 é de 800kN.

No que respeita às acções, os edifícios existentes na vizinhança da estação de metropolitano em estudo, particularmente os que se desenvolvem ao longo da secção em análise, transmitem ao terreno uma carga que se admite uniformemente distribuída. Admitiu-se que os edifícios têm 8 pisos e que sustentam uma carga de 10kN/m² a actuar nas lajes de piso. Assim sendo, pode dizer-se que a carga linear aplicada numa secção em estudo é de 80kN/m. Para a sobrecarga correspondente à circulação na rua sobre a estação adoptou-se o valor de 10kPa, ou seja, no modelo em estudo, tal acção traduz-se por uma carga linear de 10kN/m.

3 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA

Refere-se que, no local da estação, ocorrem formações da idade miocénica constituídas por camadas de *Areias da Quinta do Bacalhau* (M²_{IVb}), que estão recobertas por formações recentes tipo aluvionar constituídas por areias finas a muito finas, por vezes argilosas.

Os solos no local de implantação da obra caracterizam-se pela ocorrência de um depósito superficial (C1) com cerca de 1,0m de espessura, seguida de uma camada de depósitos aluvionares (C2A), com cerca de 7,0m de espessura que assenta num substrato (C4) designado por “areias da Quinta do Bacalhau” de idade Miocénica.

O nível freático foi detectado 11,0m abaixo do topo da laje de cobertura, ou seja, à cota 76,0m. No entanto, uma vez que a escavação foi drenada, con-

sidera-se neste estudo o nível freático à cota 61,0m (cota da soleira da laje de fundo).

Os parâmetros de resistência adoptados para as camadas em presença são os abaixo indicados (Quadro 1).

Quadro 1. Parâmetros geomecânicos adoptados no projecto

Material	C2A	C4
c' (kPa)	0,0	10,0
ϕ' (°)	30,0	32,0
E (MPa)	18,0	60,0
γ (kN/m ³)	20,0	20,0

4 SISTEMA DE OBSERVAÇÃO

O Plano de Instrumentação e de Observação da estação foi estabelecido tendo em vista procurar otimizar e compatibilizar as estruturas dos edifícios existentes e os espaços disponíveis, de modo a garantir condições de segurança da obra e das infra-estruturas vizinhas existentes (Figura 6).

Instalaram-se os seguintes aparelhos ou dispositivos de leitura:

- Alvos fixos e de nivelamento em edifícios existentes na periferia da Estação para medição de deslocamentos em três direcções e de assentamentos.
- Inclínómetros para medição de deslocamentos horizontais no interior do maciço.
- Piezómetros do tipo Casagrande para medição de níveis freáticos.

O Plano estabelecia os objectivos primordiais das actividades de observação durante a fase de construção. Tais objectivos podem ser divididos em duas categorias:

- Os relacionados com a segurança da obra.
- Os que visam o melhorar do conhecimento do comportamento dos terrenos e permitem adaptar os processos construtivos.

O Plano de Observação e instrumentação da Estação descrevia, ainda, de forma sucinta o processo construtivo da Estação e a frequência de leituras que seriam, em princípio, em função dos resultados e do estágio da obra. Foi estabelecida a periodicidade que se indica no Quadro 2. Os valores preconizados eram adequados para a situação da estação.

No que respeita a níveis de alerta, foram considerados três níveis de alerta (verde, amarelo e vermelho), tendo em consideração a proporção do deslocamento horizontal acumulado (Δh) com a altura escavada (H) e a taxa de progressão diária (taxa):

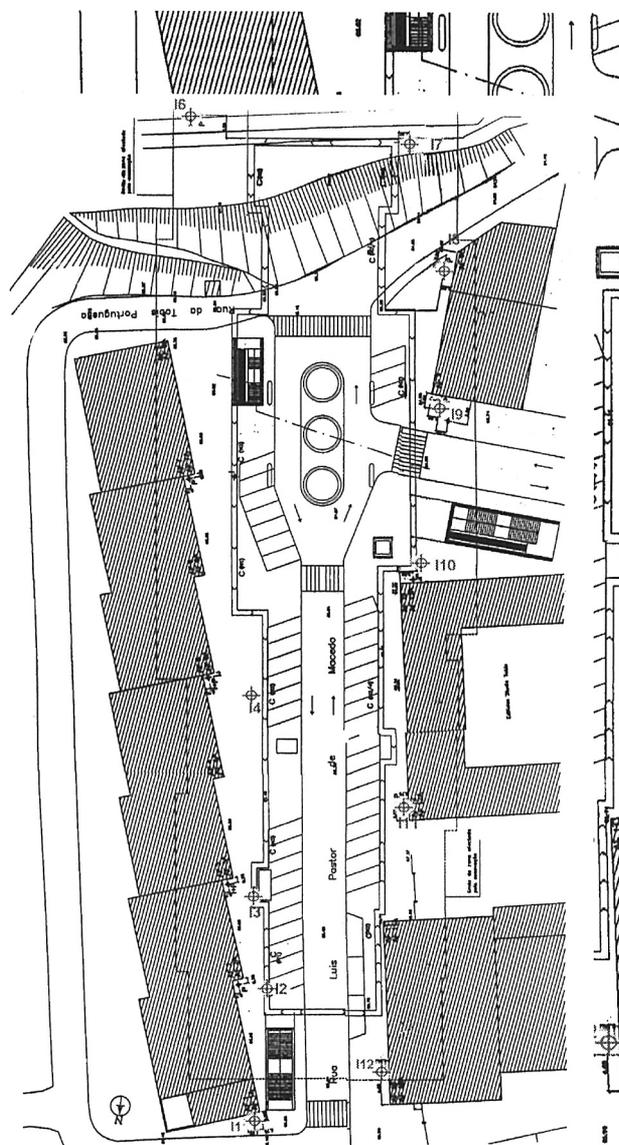


Figura 6. Plano de instrumentação

Quadro 2. Periodicidade de leituras de observação na Estação Quinta das Mouras

Equipamento de observação	Periodicidade		
	Durante as obras	Dois anos iniciais	Após dois anos
Alvos e marcas	bissemanal	Mensal	Semestral
Inclínómetros	Semanal	Mensal	Semestral
Piezómetros	Semanal	Mensal	Semestral

- Verde* – Consideram-se sensivelmente estabilizadas as deformações, o que acontece quando $\Delta h \leq 0,1H\%$ e taxa $\leq 0,15\text{mm/dia}$. As medidas recomendadas consistem em continuar a utilizar o método construtivo indicado no projecto.
- Amarelo* - Consideram-se no limite da estabilização das deformações, o que acontece quando $\Delta h \leq 0,2H\%$ e taxa $\leq 0,3\text{mm/dia}$. As medidas recomendadas consistem em analisar cuidadosamente as leituras dos aparelhos; em efectuar uma análise crítica do processo construtivo e re-

formular eventualmente o mesmo de modo a diminuir a taxa de deformação.

iii) *Vermelho* – Consideram-se instabilizadas as deformações. Deve-se agir de imediato segundo as indicações do projectista e efectuar leituras espaçadas de 4 em 4 horas. Este nível de alerta ocorre quando $\Delta h \leq 0,3H\%$ e taxa $\leq 0,45\text{mm/dia}$.

Na Figura 7, apresentam-se alguns resultados de observação do inclinómetro I9 na direcção do eixo A. A localização do inclinómetro e da direcção do eixo A está, também, indicada na Figura 6.

Junto ao edifício Tóbis, os resultados do correspondente inclinómetro mais próximo indicaram observações anómalas, pelo que foram conduzidas prospecções com georadar no maciço terroso entre a parede moldada e o edifício. Os resultados permitiram localizar tubagens no maciço e várias anomalias que não foi possível identificar. Na Figura 8, ilustra-se uma imagem obtida com o georadar, com escala de profundidades estimadas em metros para um valor admitido para a constante dieléctrica de 10 ($V=0,095\text{ m/ns}$), (areias argilosas). Foi efectuada a prospecção com um georadar da marca GSSI (USA), tendo sido utilizadas duas antenas com frequências principais de 500 e 900 MHz (Oliveira e Sousa, 2003).

5 MODELAÇÃO NUMÉRICA

Foi feita a análise estrutural de uma secção tipo, em que o faseamento construtivo assume uma importância vital, podendo contribuir decisivamente para a sua estabilidade. Foi utilizado o *software* Phase 2 por elementos finitos, da Universidade de Toronto, considerando os parâmetros geomecânicos e características dos materiais e das acções anteriormente referidas. Cada cálculo apresentava um número importante de fases, que se procuram sintetizar nas Figuras 9 a 13, onde se representam detalhes de algumas malhas de cálculo.

A Figura 14 evidencia deslocamentos horizontais da parede moldada que se encontra à direita, calculados em relação à fase1 (inicial). Os maiores deslocamentos verificam-se na fase16, na parte superior da parede, e são da ordem dos 6,5mm. A interpretação de resultados é idêntica à apresentada para a cortina do lado esquerdo, com uma diferença: na fase19 a estação sofre uma translação para a direita, e assim sendo a parede moldada desloca-se no mesmo sentido.

Foi possível constatar que estes valores numéricos dos deslocamentos horizontais se situam dentro da ordem de grandeza dos valores observados por inclinómetros.

A distribuição de zonas em cedência no maciço, ao longo do processo construtivo, é apresentada de seguida nas Figuras 15 a 19, para algumas das fases construtivas mais significativas. A escavação

do túnel TBM foi feita considerando um coeficiente de desconfinamento de 20% obtido na estação Lumiar do Metropolitano de Lisboa, para condições geomecânicas similares e utilizando uma metodologia descrita na publicação de Vieira et al. (2002).

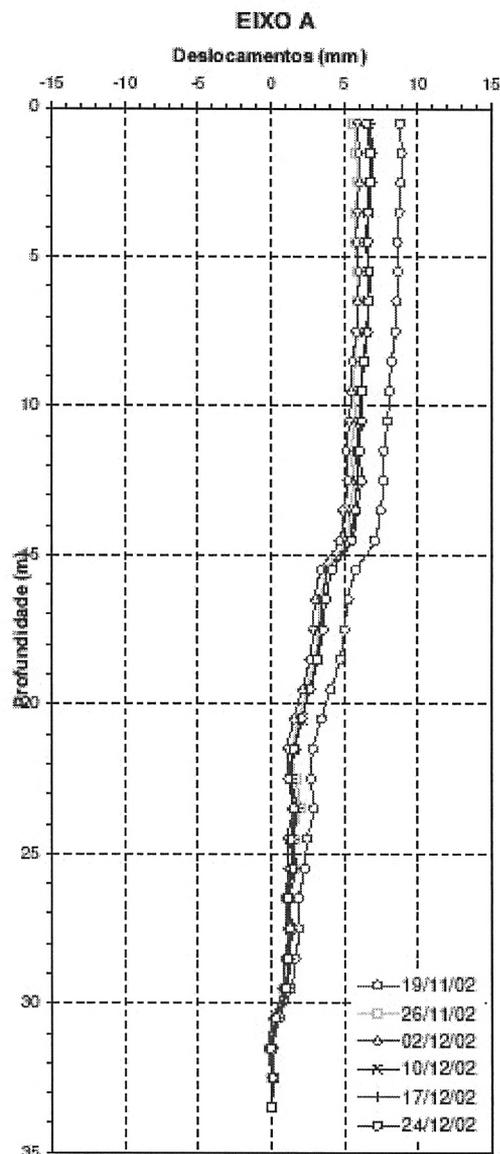


Figura 7. Deslocamentos horizontais obtidos com inclinómetro I9

Na fase 3, com a escavação do túnel, os pontos mais superficiais do maciço entram em rotura. No entanto, esta zona em rotura é também muito localizada (entre paredes moldadas) e de pequena espessura, não sendo por isso crítica. Com o início da escavação no interior da estação (fase 9), os pontos na vizinhança do túnel entram em rotura. Este fenómeno fica confinado ao interior da estação, numa zona que vai ser escavada posteriormente. Uma vez que o túnel se encontra suportado no interior e que a zona mais instável se situa entre as pa-

redes moldadas, a situação não pôs em risco a segurança da obra.

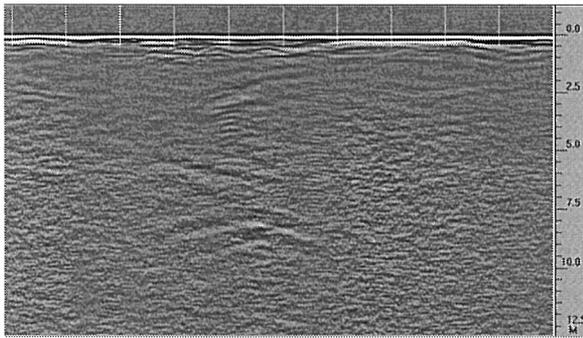


Figura 8. Imagem obtida com georadar

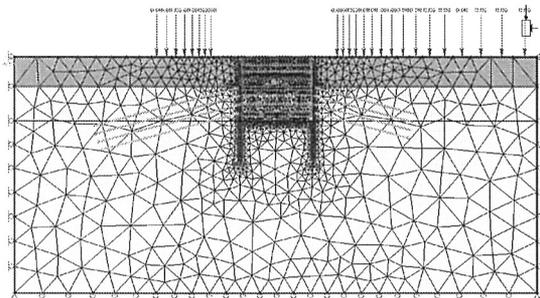


Figura 9. Execução das paredes moldadas de 0,8m, fase 1

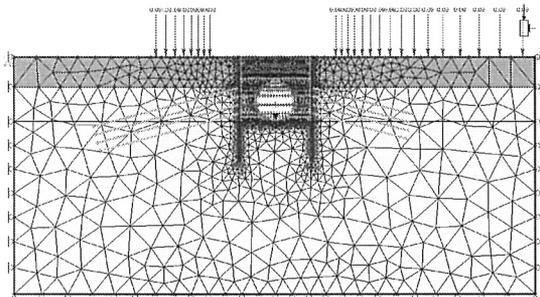


Figura 10. Passagem da tuneladora, com libertação de 20% das tensões do maciço antes da colocação das aduelas de betão, fase 2.

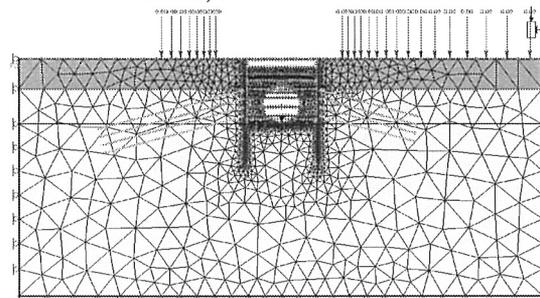


Figura 11. Início da escavação e execução da laje de cobertura com 1,5m de espessura, fase 6.

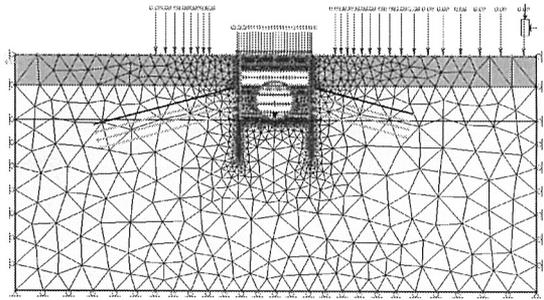


Figura 12. Execução do primeiro nível de ancoragens, fase 10.

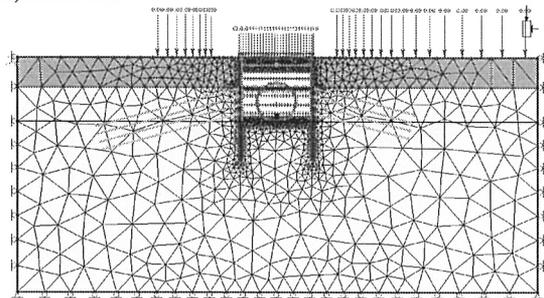


Figura 13. Desactivação das ancoragens, fase 19.

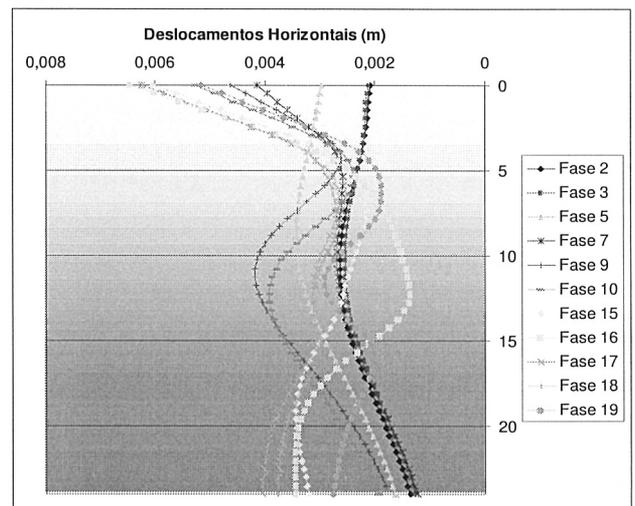


Figura 14. Deslocamento horizontais na parede moldada à direita.

A introdução das ancoragens aumenta o factor de resistência nas proximidades destes elementos de suporte, como acontece na fase 10. A introdução do ultimo nível de ancoragens (fase 16) aumenta o factor de segurança nas proximidades destes elementos de suporte. Finalmente, a remoção das ancoragens implica uma diminuição do factor de segurança sobretudo nas faces exteriores das paredes moldadas. No entanto, este parâmetro mantém-se ainda bastante superior a 1 na maior parte do maciço. As zonas em que tal não acontece são zonas na vizinhança de elementos de suporte, pelo que a segurança da obra estava verificada.

Apresentam-se, ainda, alguns resultados relativos a esforços nas paredes moldadas utilizando elementos lineares desenvolvidos numa outra malha de elementos finitos similares (Figuras 19 a 23). Na fase 3, as paredes moldadas são pouco solicitadas uma vez que os esforços provenientes da remoção do terreno são imediatamente suportados pelas aduelas de betão, visto que estas são colocadas instantaneamente com a escavação. Na fase 9, verifica-se o valor máximo do momento-flector ao qual as paredes moldadas estão solicitadas (1083 kN.m). A introdução do primeiro nível de ancoragens (fase 9) reduz significativamente o valor dos momentos-flectores. Este facto é explicado pela introdução de uma nova zona de apoio nas paredes e, conseqüentemente, redistribuição destes esforços. A fase 10, com introdução do primeiro nível de ancoragens, reduz significativamente o valor dos momentos flectores. Este facto é, também, explicado pela introdução de uma nova zona de apoio nas paredes e, conseqüentemente, redistribuição destes esforços na fase 16, a introdução do último nível de ancoragens tem um efeito semelhante ao descrito na fase 10. Neste caso a diminuição atinge valores da ordem de 300 KN.m. A desactivação das ancoragens implica um pequeno ajuste na distribuição dos momentos flectores por novas zonas de apoio (laje do fundo e intermédia), (Fase 19).

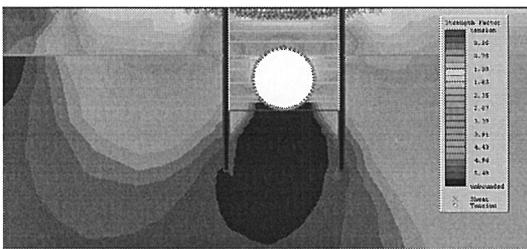


Figura 15. Zonas de cedência para fase 3 (passagem da tuneladora e libertação de 20%)

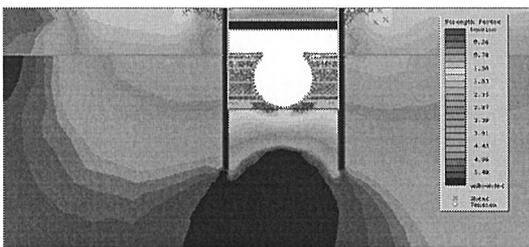


Figura 16. Zonas de cedência para a fase 9 (com escavação no interior da estação)

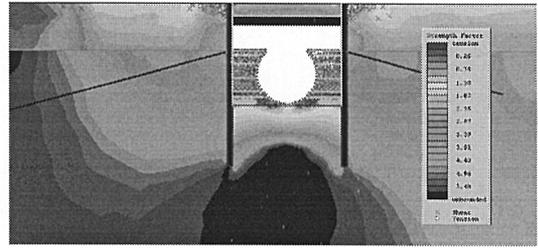


Figura 17. Zonas de cedência para a fase 10 (com introdução do primeiro nível de ancoragens)

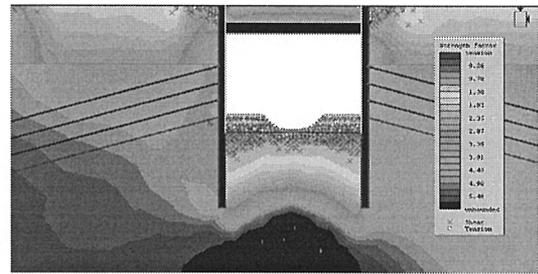


Figura 18. Zonas de cedência para a fase 16 (introdução do último nível de ancoragens)

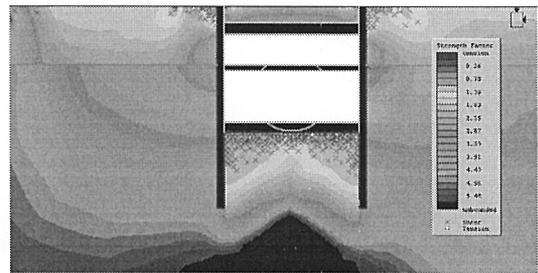


Figura 19. Zonas de roturas para a fase 19 (desactivação de ancoragens)

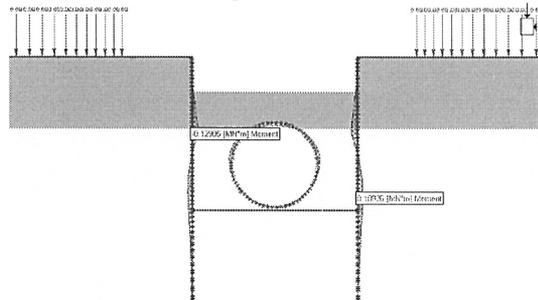


Figura 20. Momentos flectores na fase 5 (introdução das aduelas no túnel TBM)

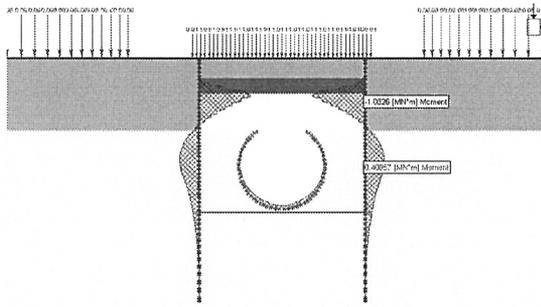


Figura 21. Momentos flectores na fase 9 (com escavação no interior)

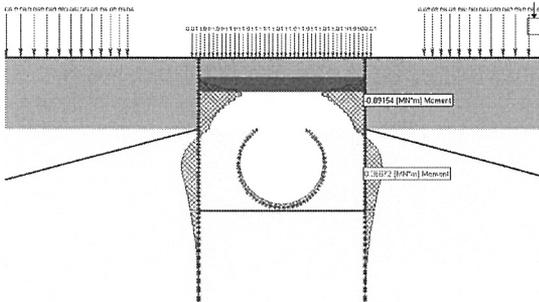


Figura 22. Momentos flectores na fase 10 (introdução do primeiro nível de ancoragens)

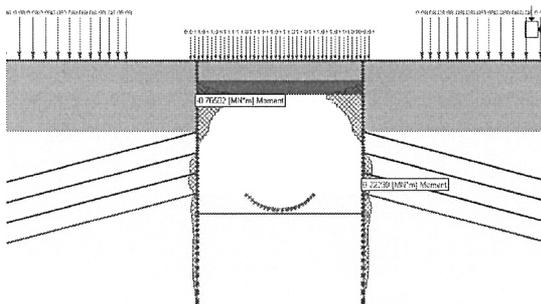


Figura 23. Momentos flectores na fase 16 (introdução do último nível de ancoragens)

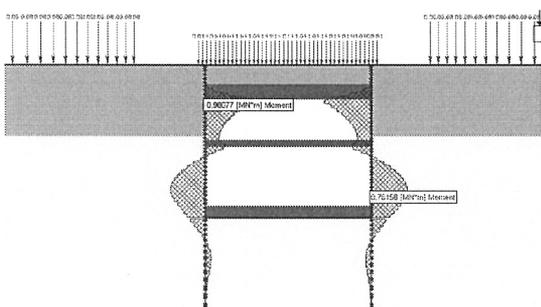


Figura 24. Momentos flectores na fase 19 (desactivação das ancoragens)

6 CONCLUSÃO

Apresenta-se um caso prático de uma estação da Linha Amarela do Metropolitano de Lisboa, praticamente concluída, em formações sedimentares típicas da região de Lisboa e de fracas características geomecânicas. Tem importantes condicionantes no que respeita às edificações envolventes.

Foi implementado um sistema de observação rigoroso, que permitiu, para as diferentes fases da vida da obra, garantir a monitorização da segurança.

Complementou-se com um extenso volume de cálculos numéricos para aferir os valores observados.

AGRADECIMENTO

Ao Metropolitano de Lisboa agradece-se pela possibilidade de incluir informação respeitante à Estação Quinta das Mouras.

O trabalho foi efectuado no âmbito de um projecto do Programa POCTI intitulado *Concepção, Projecto e Reabilitação de Túneis em Obras Viárias*.

REFERÊNCIAS

- Melâneo, F. 2001. Prolongamento da Linha Amarela do Metropolitano de Lisboa. O projecto, as obras e a minoração das interferências à superfície. Curso Sobre Túneis em Meios Urbanos, Sociedade Portuguesa de Geotecnia, Coimbra: 14.
- Melâneo, F.; R.L. Sousa, C. Jorge 2003. Prolongamento da Linha Amarela do Metropolitano de Lisboa entre o Campo Grande e Odivelas. Término de Odivelas. Jornadas Luso-Espanholas sobre Relevância da Prospecção e Observação Geotécnicas nas Obras Subterrâneas, Madrid.
- Oliveira, M.; Sousa, L.R. 2003. Inspecção por georadar do túnel do Meão. LNEC, Relatório, Lisboa: 86.
- Sousa, L.R.; J.M. Silva; N. Leitão; J. Portugal; A. Vieira 2001. Acompanhamento das obras de expansão do Metropolitano de Lisboa. Linha Campo Grande – Odivelas. LNEC, 1º Relatório, Lisboa.
- Vieira, A.; J.M. Silva; J. Barreto, L.R. Sousa 2002. Análise numérica do comportamento de estruturas na estação do Lumiar do Metropolitano de Lisboa. 8º Congresso Nacional de Geotecnia, Lisboa: 2665-2679.