

TRATAMENTO DE CONSOLIDAÇÃO E INJEÇÕES DE COMPENSAÇÃO ESTAÇÃO DO SALDANHA I. METROPOLITANO DE LISBOA

CONSOLIDATION TREATMENT AND COMPENSATION GROUTING SALDANHA I SUBWAY-STATION. LISBON SUBWAY

Cabral, Miguel, *Tecnasol FGE, Lisboa, Portugal, mcabral@tecnasol-fge.pt*

Barata, Carlos, *Tecnasol FGE, Lisboa, Portugal, jbarata@tecnasol-fge.pt*

Durão, João, *Tecnasol FGE, Lisboa, Portugal, jdurao@tecnasol-fge.pt*

Machado do Vale, José, *Tecnasol FGE, Lisboa, Portugal, jlmvale@tecnasol-fge.pt*

Oliveira, Gonçalo, *Tecnasol FGE, Lisboa, Portugal, goliveira@tecnasol-fge.pt*

RESUMO

Refere-se o presente documento à apresentação da solução preconizada, desenvolvida e aplicada no Tratamento de Consolidação e Injeções de Compensação, realizada em zona subjacente à estação do Saldanha I da Linha Amarela, na área correspondente à passagem da Tuneladora para a construção do novo troço da Linha Vermelha do Metropolitano de Lisboa.

ABSTRACT

The aim of this paper is to present a case history, in the development and application point of view, using Consolidation Treatment and Compensation Grouting to improve the foundation ground of the Saldanha I subway-station, in Lisbon, for the passage of the Tunnelling Boring Machine (TBM), during the construction of a new subway line.

1. INTRODUÇÃO

O prolongamento da Linha vermelha do Metropolitano de Lisboa, entre a estação Alameda II e a estação S. Sebastião II, origina um cruzamento com a Linha Amarela que ocorre sob a estação Saldanha I (existente na Av. da República), passando a Tuneladora sob o átrio Norte dessa estação com um recobrimento considerado reduzido (cerca de 4,5 a 5m) face ao diâmetro do túnel a escavar (Figura 1 e Figura 2).

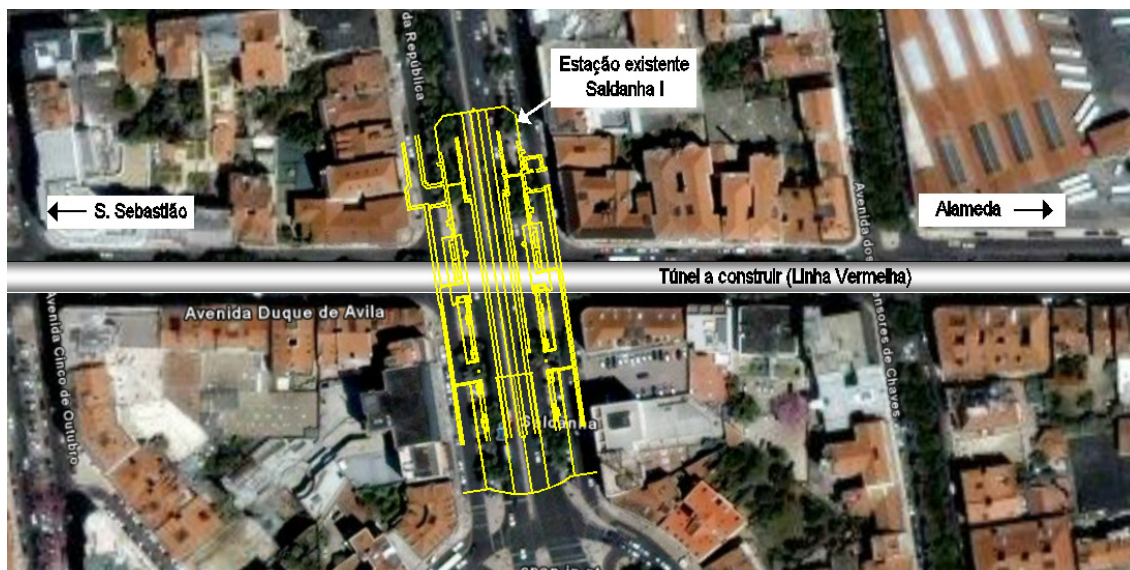


Figura 1 – Planta do cruzamento entre a Linha Amarela e a Linha Vermelha.

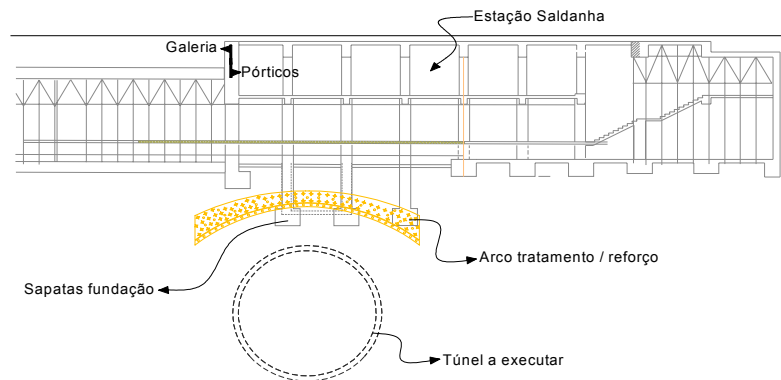


Figura 2 – Corte transversal pelo cruzamento entre a linha Vermelha e a linha Amarela.

Os terrenos de fundação da estação Saldanha I encontram-se caracterizados pela ocorrência de Argilas e Calcários dos Prazeres (Miocénico), aqui representada essencialmente por argilas rijas e argilas margosas, genericamente recoberta por depósitos de aterro (Olocénico).

Estava previsto que a Tuneladora passasse sob a estação Saldanha I em dois dias, interrompendo-se apenas a circulação do metropolitano durante esse período. Seria então necessário minimizar o impacto dessa passagem na estrutura da estação e na via do metropolitano de forma a evitar que a tuneladora parasse durante a travessia e permitindo o restabelecimento das condições necessárias para que fosse retomada a circulação do metropolitano de forma rápida e em total segurança.

2. PROJECTO

O projecto foi desenvolvido pela Figueiredo Ferraz, com a colaboração do Prof. Mineiro (consultor do Metropolitano de Lisboa) e da Tecnasol FGE. Tendo por base as características dos terrenos a atravessar, a qualidade de construção da estação e os assentamentos reais verificados em outros pontos durante a passagem da Tuneladora (em particular no Arco do Cego) foram estimados os assentamentos globais e diferenciais associados à escavação do túnel da linha vermelha, na zona inferior à estação do Saldanha I, de forma empírica (com base no método sugerido por Schmidt e Peck (1969)) e por análise comparativa, tendo-se concluído que a passagem da Tuneladora originaria um assentamento máximo à superfície variável entre os 6,9mm e os 19,5mm (Figura 3).

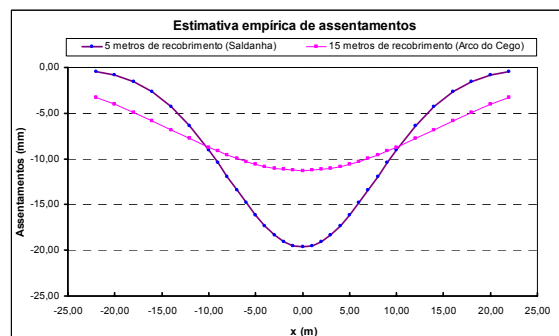


Figura 3 – Estimativa empírica de assentamentos.

2.1 Tratamento de reforço

Foi então elaborado um projecto prevendo a execução de uma zona de tratamento localizada a meia altura do recobrimento do túnel a executar abrangendo, em planta, toda a área de intersecção do novo túnel com a estação do Saldanha I. Ocupando uma área, mais ou menos

rectangular em planta, com cerca de 15m de largura e 30m de desenvolvimento, dispendo-se a maior direcção de forma paralela ao eixo de desenvolvimento do novo túnel (Figura 4).

Tendo em vista o reforço atrás referido, na direcção transversal ao desenvolvimento do novo túnel, definiu-se uma configuração em arco para a fatia de terreno a tratar, permitindo uma melhor transferência de carga transversal e um melhor comportamento longitudinal associado a uma maior rigidez de flexão. Esta maior rigidez seria ainda reforçada pela realização das enfilagens em fibra de vidro, e que ao serem seladas ao terreno através de uma calda de cimento injectada a pressão adequada, promoveriam uma excelente ligação e a materialização do efeito de conjunto pretendido.

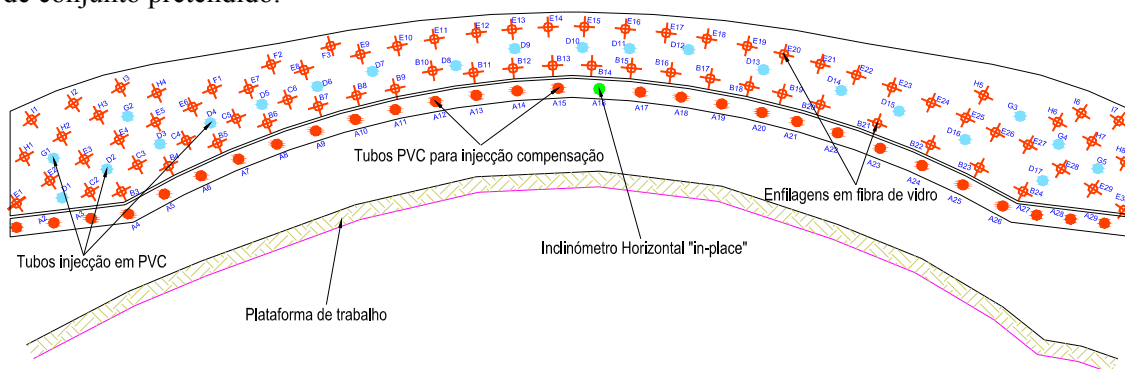


Figura 4 – Perfil transversal do arco de tratamento.

Sendo a materialização desta zona de tratamento um factor essencial para a eficácia da solução proposta, e de forma a criar um factor adicional como garantia da sua execução, dispuseram-se ao longo de todo o seu desenvolvimento transversal, tubos de PVC dotados de válvulas “manchete”, que permitiram realizar injeções de alta pressão, com o intuito de reforçar a existência do “efeito de conjunto” necessário.

2.2 Injeções de compensação

As injeções de compensação consistem em injectar, no instante e nos pontos adequados da área de tratamento, um volume de calda de cimento que permita controlar e se possível contrariar, os assentamentos provocados pela escavação efectuada na passagem da Tuneladora.

De modo a poder cumprir este objectivo, foi criada uma fiada de furos localizada imediatamente abaixo da zona de reforço, espaçados de cerca de 0,5m, onde seriam colocados tubos de PVC com válvulas “manchete” (Figura 4). Aqueles tubos iriam permitir realizar injeções de alta pressão de modo selectivo e repetitivo em função dos deslocamentos medidos.

Todo este processo iria implicar uma boa compatibilização entre a sequência e programa de injeções, os movimentos registados de forma associada à escavação do túnel, e a comprovação da sua eficácia com a obtenção de resultados a partir dos instrumentos de monitorização instalados nas estruturas e serviços a proteger.

3. PRODUÇÃO

3.1 Preparação de obra

Dado o carácter singular da obra a executar, a sua sensibilidade, risco e exigência, foi necessário realizar um estudo exaustivo e um planeamento cuidado na perspectiva de levar à prática a sua execução, tendo sido, para o efeito, necessário proceder a alguns testes de características e utilização de materiais, equipamentos e instrumentos de monitorização.

3.1.1 Materiais

Os tubos de fibra de vidro definidos, como armadura das enfilagens, apresentam um diâmetro exterior de 76mm, e um diâmetro interior de 60mm, parede exterior com espiral de aderência melhorada, uma tensão resistente de cedência à tracção de 600MPa, e uma tensão resistente de cedência ao corte de 100MPa e com um módulo de elasticidade de 20GPa. Estes tubos foram ainda munidos de válvulas “manchete”, dispostas com espaçamentos da ordem de 1m.

Devido às restrições geométricas do local de trabalho foi necessário criar uniões que conferissem a garantia de continuidade das características resistentes ao longo de todos os 30 metros da enfilagem. Para se chegar ao modelo de união utilizado em obra foi necessário ensaiar diferentes tipos de união e vários tipos de resina para solidarizar a união à extremidade do tubo de fibra de vidro (Figura 5).



Figura 5 – Ensaio de uniões metálicas.

Foram também ensaiadas diferentes composições de caldas de cimento com o intuito de se chegar à composição dos diversos tipos de calda a utilizar em obra, testando-se a sua injectabilidade e sendo recolhidas amostras para determinação da sua resistência à compressão uniaxial ($f_{cd} > 25$ MPa) e módulo de deformabilidade ($E_c > 20,0$ GPa).

3.1.2 Métodos de Perfuração

Tendo em conta as características dos terrenos a atravessar, as argilas rijas dos Prazeres, e o facto de ser necessário atravessar sapatas de fundação da estação Saldanha I em algumas zonas do tratamento a efectuar (Figura 2), foram previstos para a obra os seguintes tipos de perfuração com revestimento (a utilização de revestimento do furo evita a instabilização das paredes do furo, impede a perturbação do terreno com os fluidos de perfuração e permite minimizar os desvios na direcção do furo ao longo da furação):

Perfuração a trado com revestimento

A perfuração a trado com revestimento é executada através da acção rotativa, transmitida por uma cabeça dupla de rotação instalada na máquina de perfuração, ao conjunto constituído pelos trados e ponteira e ao revestimento de forma individualizada.

Perfuração à rotopercussão com martelo fundo-de-furo e revestimento

A perfuração com martelo fundo-de-furo combina a acção rotativa, transmitida pela cabeça de rotação da máquina de perfuração à coluna de varas de rotopercussão, com a percutiva, transmitida pelo martelo e bit através da acção do ar. Este sistema foi utilizado apenas para a perfuração das sapatas de fundação da estação.

Em obra foram testados outros métodos de perfuração semelhantes, no que se refere à manutenção do revestimento do furo, com a intenção de se obter melhoria de rendimento. Estes outros métodos revelaram-se, no entanto, mais agressivos, produzindo maior deformação associada aos processos de perfuração, pelo que não foram adoptados.

Posicionamento e orientação dos furos

A execução da furação no que se refere ao posicionamento/alinhamento, foi guiada por sistema de laser a partir de um “gabarit” e da implantação topográfica na frente de trabalho. A verificação da inclinação/orientação dos furos no final da sua execução foi efectuada com recurso à utilização de um inclinómetro horizontal.

3.1.3 Métodos de Injecção

Para a execução das injecções foi prevista a utilização de uma central de injecção tipo Domine, com quatro linhas de injecção independentes, sendo o controlo da injecção realizado com recurso ao sistema VOPI (Figura 6). Este sistema efectua automaticamente as paragens em cada operação de injecção, com base nos parâmetros de pressão e volume pré-estabelecidos e configurados no Datalogger, realizando também o registo contínuo dos parâmetros de cada injecção individual (pressão, volume e caudal).



Figura 6 – Sistema de controlo de injecção VOPI e injecto.

Foi previsto utilizarem-se quatro tipos de injecção distintos:

- Injecções de selagem para promover a solidarização do tubo PVC com o terreno envolvente, utilizando uma calda plástica de forma a permitir a posterior abertura das válvulas “manchete” durante as restantes fases de injecção.
- Injecções de permeação que têm como objectivo colmatar os poros do terreno, substituindo o ar e/ou água existente no seu interior por calda de cimento, sendo a injecção realizada a uma pressão baixa de forma a evitar o empolamento do terreno.
- Injecções de compactação que consistem na injecção de um certo volume de calda de elevada densidade, a alta pressão sem provocar a fracturação hidráulica do terreno.
- Injecções de compensação que têm como objectivo provocar o deslocamento controlado do terreno, de forma a compensar os assentamentos provocados pela passagem da Tuneladora. Sendo este um termo genérico que pode englobar injecções de permeação, injecções de compactação ou injecções de fracturação/”clacagem”.

Os trabalhos de injeção realizados foram os seguintes:

Injeções de selagem/compactação de enfilagens em fibra de vidro: A injeção de selagem das enfilagens em fibra de vidro foi executada à pressão de 1500 kPa de forma a preencher o espaço anelar do furo e promover simultaneamente a compactação do terreno envolvente. A calda utilizada foi uma calda de elevada densidade e elevada concentração de cimento.

Injeções de selagem de tubos de injeção em PVC: A injeção de selagem dos tubos de injeção em PVC foi realizada à pressão de 500 kPa. A calda utilizada foi uma calda plástica de forma a permitir a posterior abertura das válvulas “manchete” durante as restantes fases de injeção.

Injeções de compensação: As injeções de compensação foram realizadas através dos tubos de injeção em PVC da fiada inferior do arco de tratamento. As pressões utilizadas foram da ordem dos 1500 kPa, tendo-se utilizado uma calda de cimento de elevada densidade.

Foi realizado em obra um ensaio de “clacagem”, com um recobrimento de cerca de 5m, para aferição das pressões necessárias para se provocar a fracturação hidráulica do terreno, tendo-se registado a fracturação hidráulica do terreno a uma pressão mínima de 4000 kPa. Não foi necessário recorrer a esse processo de injeção na fase de compensação.

3.1.4 Plano de Monitorização

Foi desenvolvido um plano de instrumentação da estação Saldanha I com o objectivo de efectuar o controlo sistemático “on-line” dos efeitos produzidos durante os trabalhos de melhoramento/reforço dos terrenos de fundação, da passagem da Tuneladora sob a estação e da acção das injeções de compensação onde e quando executadas (Figura 7).

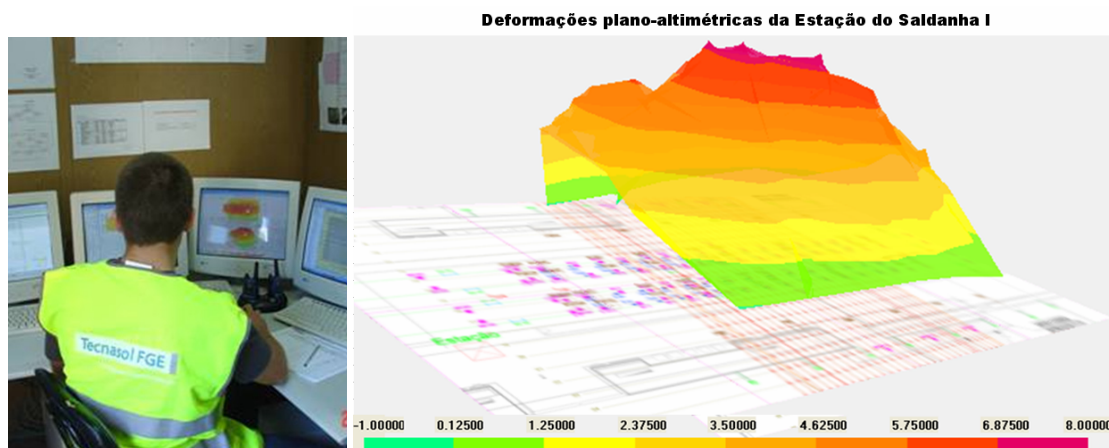


Figura 7 – Controlo e monitorização dos deslocamentos (fim de compensação pró-activa).

O sistema de monitorização a implementar foi dimensionado de acordo com os requisitos considerados essenciais para o cumprimento dos objectivos da obra e premissas do projecto, admitindo-se que seriam produzidas deformações controladas em fases distintas e em função dos resultados observados pelo conjunto de instrumentos.

Foi contemplado pelo sistema a medição dos seguintes parâmetros:

- a) monitorização estrutural: deformações altimétricas e tensões na via / linhas de circulação;

b) monitorização topográfica: deformações plano-altimétricas e rotacionais da estrutura da estação Saldanha I e da via de circulação do metropolitano (Átrio Norte).

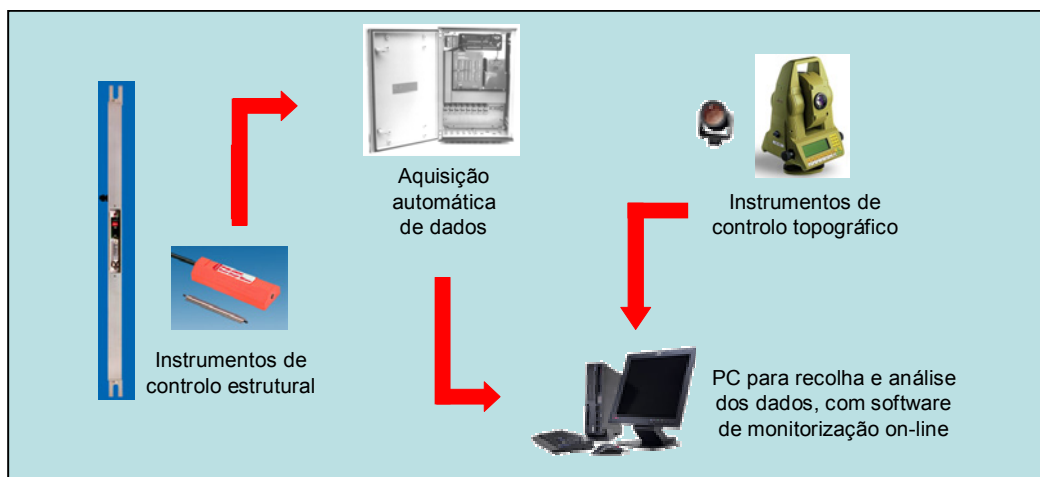


Figura 8 – Histograma do sistema de monitorização da obra.

Assim sendo, englobados no sistema de monitorização automatizado, foram instalados EL beam sensors, spot-weldable strain gauges, estação total TCA, e mini-prismas ópticos e, em regime de leituras discretas, foram instaladas marcas de nivelamento e réguas de nivelamento.

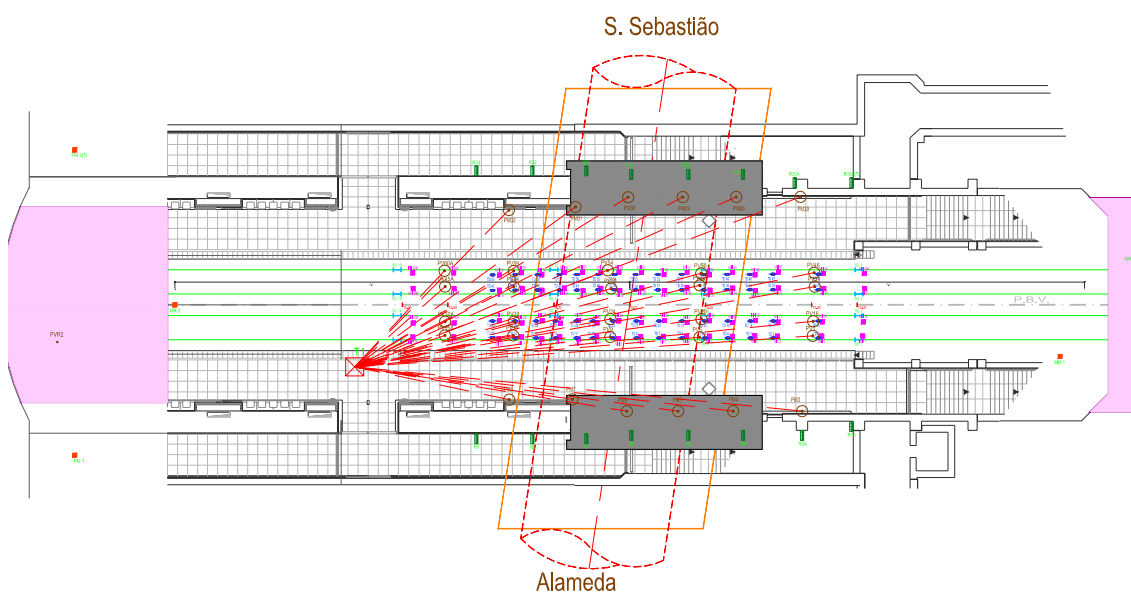


Figura 9 – Planta de localização da instrumentação instalada.

No final da execução do arco de tratamento a partir do interior do poço, foi instalado na sua base e ao longo do tratamento efectuado um inclinómetro horizontal “in-place” com 20 metros de comprimento, com um sensor de leitura a cada 2 metros, com o intuito de monitorizar o comportamento do arco de reforço durante a passagem da Tuneladora e fase de compensação (Figura 4).

3.2 Fase de execução

Existiram em obra quatro fases distintas do ponto de vista da produção. Uma primeira fase em que foi executado todo o arco de tratamento; uma segunda fase referente ao período de acompanhamento e monitorização durante a passagem da Tuneladora sob a referida estação; uma terceira fase em que se procederam às injecções de compensação necessárias para garantir

a estabilização e recuperação dos deslocamentos verificados, gerando o empolamento controlado à superfície; uma última fase de acompanhamento que corresponde ao período de afastamento da Tuneladora e de confirmação da estabilização dos movimentos.

3.2.1 Arco de Tratamento de Reforço/Compensação Pró-Activa

Nesta fase, e mantendo-se o metropolitano em circulação, com exploração normal da via e estação, o principal cuidado residiu na observação e controlo das deformações a produzir sobre a via de circulação, tendo sido produzidas essencialmente duas actividades potencialmente geradoras de situações de instabilidade, a furação e as injeções de selagem.

A partir de cerca de 50% do tratamento começou a produzir-se deformação activa gerando o empolamento controlado com a forma aproximada de uma curva de Gauss invertida (Figura10).

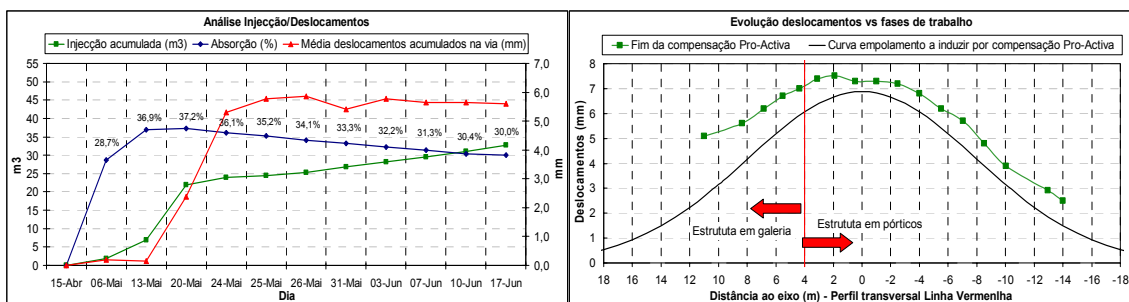


Figura 10 – Análise dos deslocamentos função do volume injectado/absorção. Comparação curva de assentamentos estimados/empolamentos promovidos na via.

Esta fase dos trabalhos teve uma duração de cerca de sete semanas em contínuo (24 horas/dia), tendo-se realizado as seguintes quantidades de trabalho:

- Furação: 3.720 metros;
- Enfilagens em fibra de vidro: 2.190 metros;
- Tubos de injeção em PVC: 1.530 metros;
- Injeções de selagem: 70.000 kg de cimento.

3.2.2 Atravessamento da Tuneladora sob a estação Saldanha I

Para esta fase dos trabalhos foi criado um Gabinete de Acompanhamento Técnico (GAT), constituído pelo Metropolitano de Lisboa (Dono de Obra), Prof. Mineiro (consultor do Metropolitano de Lisboa), Figueiredo Ferraz (Projectista), Ferconsult (Fiscalização) e ACE – Prolongamento da Linha Vermelha (Empreiteiro Geral), tendo sido concebido um plano de contingência. Foram estabelecidos, nesse plano de contingência, pelo GAT, 3 níveis de actuação: nível de alerta Verde, Amarelo e Vermelho. Tendo sido estabelecidos os limites de deslocamentos verificados para cada um dos níveis.

As equipas de instrumentação da Tecnasol FGE e da Ferconsult efectuaram conjuntamente um acompanhamento exaustivo, 24 horas/dia, dos deslocamentos detectados por todos os instrumentos instalados na Estação Saldanha I e no Poço exterior, com recurso a software próprio para visualização “on-line” dos efeitos e emissão de um relatório a cada 4 horas. A cada 12 horas foi realizada uma reunião com todos os elementos do GAT, para análise dos dados disponíveis.

Esta fase dos trabalhos teve a duração de cerca de 96 horas, tendo terminado na manhã do dia 2 de Julho de 2005. A tuneladora trabalhou em regime contínuo, em dois turnos, com um avanço

médio de 12 Aduelas/dia, com controlo permanente dos parâmetros. Não foi necessário recorrer a injeções de compensação durante o atravessamento da Tuneladora sob a estação, uma vez que as deformações entretanto registadas não ultrapassaram o empolamento anteriormente imposto pela compensação pró-activa.

3.2.3 Injecções de Compensação Reactiva

Após a passagem da Tuneladora, foram executadas injeções de compensação, para preenchimento dos possíveis vazios criados pela escavação da nova linha e como processo de controlo e inversão dos assentamentos verificados.

Foram injectados 12 furos de injeção na zona central do arco de tratamento, de forma alternada injectando-se as válvulas “manchete” de cada furo também de forma alternada. Em cada furo as injeções foram executadas no sentido do fundo do furo para a boca. No total foram injectados 12 furos, 116 válvulas “manchete” e 7.512 litros de calda de cimento (6.710 kg de cimento).

3.2.4 Período final de monitorização

Os deslocamentos verificados na Estação Saldanha I, após paragem das injeções de compensação, estabilizaram a partir do dia 9 de Julho, verificando-se apenas na via de circulação do metropolitano as variações normais existentes entre os períodos com e sem tráfego (Figura 11), tendo sido dada como terminada esta operação.

4. CONCLUSÃO

Na fase de compensação pró-activa, com o desenvolvimento dos trabalhos de consolidação, foram gerados empolamentos na via de circulação, com uma configuração aproximada da curva invertida de assentamentos estimados. Foi atingido um empolamento máximo acumulado ao eixo, sobre o arco de tratamento, na ordem dos 7,5mm, mantendo-se este valor dentro dos critérios de aceitabilidade definidos pelo projecto (Figura 11). Este empolamento imposto na via de circulação permitiu compensar antecipadamente os efeitos das deformações provocadas pelo atravessamento da Tuneladora sob a estação.

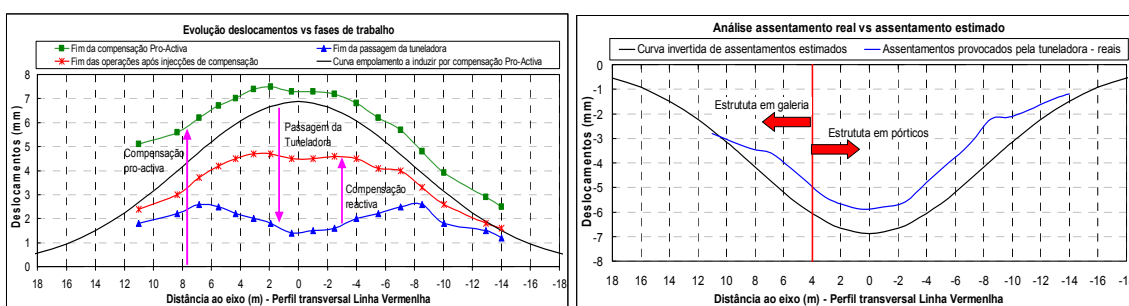


Figura 11 – Deslocamentos estimados vs. Deslocamentos reais.

Na fase de atravessamento da Tuneladora verificou-se na base do arco de tratamento, através do inclinómetro horizontal “in-place”, um assentamento máximo na ordem dos 9,5mm sensivelmente ao eixo da via de circulação (Figura 12), verificando-se à cota da via de circulação um assentamento máximo de cerca de 6mm (Figura 11). Assim, pode admitir-se que o efeito de consolidação e reforço conseguido através do arco de tratamento, tenha contribuído para a existência de um diferencial nos valores do deslocamento verificado entre estes dois locais de medição, com afastamento em cota de cerca de 4 metros.

Na fase de compensação reactiva, as injeções efectuadas após ter sido anulado o desconfinamento provocado pelo atravessamento da Tuneladora, promoveram uma recuperação significativa com máximo de 7mm dos assentamentos anteriormente verificados na base no arco de tratamento de reforço (Figura 12), reflectindo-se uma recuperação à cota da via de circulação de cerca de 3,5mm.

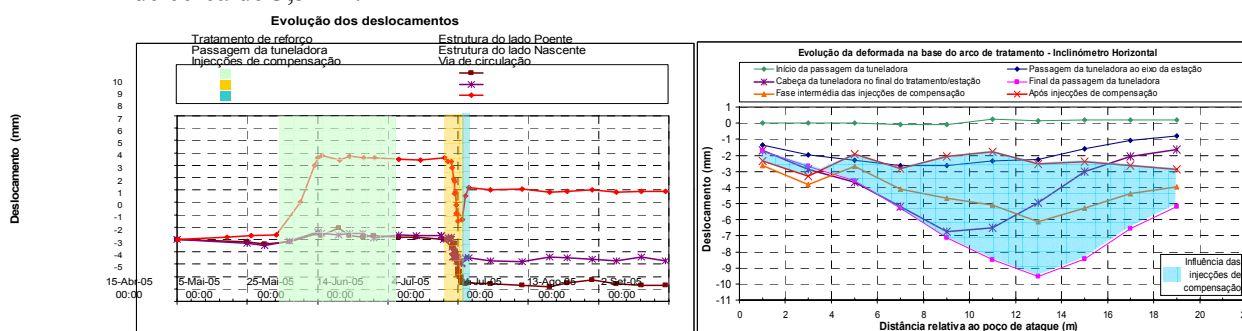


Figura 12 – Evolução dos deslocamentos ao longo das várias fases da obra.

Os assentamentos verificados na estrutura da estação foram inferiores aos valores mínimos para que houvesse necessidade de se proceder à sua compensação, tendo-se apenas garantido a estabilização dos terrenos sob as suas fundações. As injeções de compensação incidiram apenas sobre a via de circulação do metropolitano, (Figura 12).

O arco de tratamento de reforço permitiu reduzir em cerca de 40% os assentamentos verificados na via devido ao atravessamento da Tuneladora sob a estação Saldanha I. Na fase de injeções de compensação reactiva o arco permitiu, numa primeira fase, o tratamento dos terrenos desconfinados entre este e o túnel escavado e, numa fase posterior a recuperação controlada dos assentamentos sofridos pela via de circulação.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores do presente documento gostariam de enaltecer o espírito de cooperação, de interesse e empenho, manifestado por todos os intervenientes bem como a disponibilidade demonstrada na colaboração técnica e nas “mais valias” acrescentadas pelas diferentes experiências, em apoio do sucesso e garantia de eficácia da solução apresentada e da sua execução.

Resta-nos agradecer ao Metropolitano de Lisboa e ao ACE – Prolongamento da Linha Vermelha a autorização para publicação do presente artigo.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Figueiredo Ferraz – “Projecto de execução dos trabalhos afectos às injeções de compensação e transferência de cargas na estação Saldanha I.” (2005).
- [2] Spie Batignolles – “Túnel com escudo, pressão de confinamento – Saldanha, Memória Justificativa.” (2005).
- [3] Tecnasol FGE – “Passagem da Tuneladora sob a linha Amarela - Tratamento de Consolidação com enfilagens injectadas e injeções de compensação. Projecto de execução e Plano de Instrumentação.” (2004/2005).
- [4] Tecnasol FGE – Documentação diversa de obra (2005).