

INJECCÕES DE COMPENSAÇÃO “SOILFRAC” - DESCRIÇÃO DO MÉTODO E SUA APLICAÇÃO EM OBRAS DO METRO DE LISBOA

THE USE OF “SOILFRAC” TECHNIQUE IN COMPENSATION GROUTING WORKS FOR THE LISBON’S SUBWAY

Candeias, Miguel A.S.

Engº Geólogo, Keller Grundbau (Portugal)

Antunes, José Luis F.B.

Engº Civil, Keller Grundbau (Portugal)

RESUMO:

A construção de uma nova linha do Metropolitano de Lisboa implicou a escavação de túneis sob diversos edifícios antigos no centro da cidade. A técnica da fracturação hidráulica de terrenos “Soilfrac” foi utilizada para proteger do efeito de excessivos assentamentos uma área edificada de cerca de 20.000 m² sem interferir com a sua normal utilização.

Na presente comunicação descreve-se genericamente a técnica utilizada e realçam-se os aspectos mais relevantes da sua aplicação em três zonas das novas “Linhas da Baixa” (rua 1º Dezembro, Ministério da Marinha/Praça do Município e estação Baixa-Chiado).

ABSTRACT:

The construction of a new subway line of Lisbon’s Metro has required the excavation of tunnels under several old buildings in the center of Lisbon. The technique of hydraulic soil-fracturing (“ Soilfrac”) was used to protect buildings in an area of some 20,000 m² from the effect of excessive settlements without interfering with their normal usage.

In the present paper it is described in general terms the used technic and pointed out the most relevant aspects from its application in three different zones of the new subway line “Linhas da Baixa”(rua 1º Dezembro, Ministério da Marinha / Praça do Município and Baixa-Chiado station).

1. INTRODUÇÃO

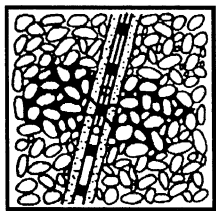
Durante muito tempo, a estabilização e consolidação de solos finos, não injectáveis convencionalmente, constituiu um desafio para a engenharia de fundações.

O desenvolvimento do conceito de fracturação hidráulica de solos (“ Soilfrac”) vem assim complementar - e mesmo, em muitos casos, substituir - os vários tipos de injeção já existentes (Fig.1), tendo esta técnica sido inicialmente desenvolvida na exploração petrolífera para aumentar a produtividade das jazidas.

Actualmente, a tecnologia “ Soilfrac “ tem vindo a ser utilizada com o intuito de melhorar a capacidade de suporte de solos e reduzir potenciais assentamentos, sendo também frequentemente utilizada para proceder ao renivelamento controlado de estruturas [1] [2].

Assim, para além da sua aplicação na estabilização e consolidação de solos, a técnica “ Soilfrac “ tem vindo a ser cada vez mais aplicada em áreas urbanas, como um meio de estabilizar - e, até mesmo, recuperar - assentamentos em edifícios, ou outras estruturas, sem que a sua normal utilização seja

substancialmente afectada. Nestas circunstâncias, a utilização de técnicas de injeccção exige um elevado grau de precisão (da ordem do milímetro), quer quanto ao controlo das elevações induzidas, quer quanto à limitação dos efeitos à área de tratamento pretendida, sem afectar as áreas circundantes.

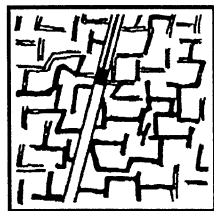


INJECCÃO PARA PREENCHIMENTO DE POROS

Em:
Areia e Seixos

Para:
Estabilização
Consolidação
Impermeabilização

Através de:
Cimento
Cimento Microfino
Injecção Química

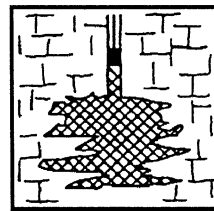


INJECCÃO DE FISSURAS

Em:
Rocha Fissurada

Para:
Estabilização
Impermeabilização

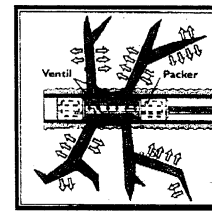
Através de:
Calda de Cimento
Argamassa



INJECCÃO PARA PREENCHIMENTO DE CAVIDADES

Em:
Espaços Artificiais (Trabalhos Mineiros)
Espaços Naturais (Cavidades, Karsts, Zonas Lixíviadas)

Através de:
Misturas de Cimento e Inertes



INJECCÃO MULTIPLA "SOILFRAC"

Em:
Todos os solos

Para:
Melhoramento de solos e Elevação controlada de estruturas

Através de:
Calda de Cimento

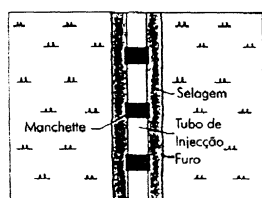
Fig. 1 - Tipos de injeccção mais comuns e injeccção " Soilfrac" [3]

2. A TÉCNICA " SOILFRAC "

O principio da técnica " Soilfrac " consiste essencialmente na injeccção múltipla, no terreno a tratar, de pequenos volumes de calda de cimento. Para efectuar esta injeccção é necessária a furação e instalação de tubos com "manchettes", a partir da superfície ou do interior de edifícios, poços, ou galerias. Posteriormente, são inseridos obturadores nestes tubos, os quais vão actuar em cada "manchette", injectando a calda adequada ao objectivo do tratamento.

Na injeccção de calda num terreno normalmente consolidado, isto é, com tensões horizontais menores que as tensões verticais, as primeiras lamelas de cimento produzidas no solo terão predominantemente uma direcção vertical, o que originará um acréscimo de tensões horizontais de compressão no solo. Assim, das primeiras injeccções resultará um melhoramento do solo em termos de deformabilidade, visto este ficar reforçado por um esqueleto de suporte constituído por lamelas de material sólido, procurando-se que as tensões horizontais igualem as tensões verticais pré-existentis (Fig. 2).

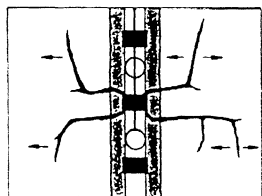
A partir deste estado, qualquer injeccção adicional causará a compressão do solo, originando o crescimento simultâneo das tensões verticais e horizontais, provocando elevações [4].



ESTADO INICIAL

Tubo de injeção instalado
Solo normalmente consolidado

$$\sigma_H < \sigma_V$$

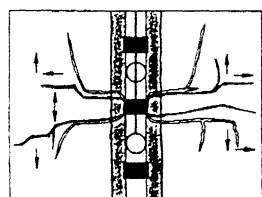


INJEÇÃO PRIMÁRIA

Lamelas de cimento predominantemente verticais
Pré-Tensionamento Horizontal

$$\sigma_H \text{ Crescente}$$

⇒ Compactação



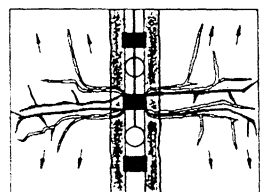
INJEÇÃO SECUNDÁRIA

Aumento do número de lamelas horizontais de cimento
Pré-Tensionamento Horizontal e Vertical

$$\sigma_H \sim \sigma_V$$

⇒ Compactação

⇒ Tendência para Elevação



INJEÇÕES SEGUINTE

Aparecimento de novas lamelas e alargamento das existentes

⇒ Elevação

Fig. 2 - Fases de aplicação do sistema de injeção múltipla "Soilfrac"

É muito importante conhecer-se, com precisão e rapidez, os efeitos induzidos à superfície pelas injeções que se vão efectuando. Assim, é essencial à elaboração de qualquer plano de injeção a existência de um sistema de instrumentação que permita o controlo permanente daqueles efeitos com adequada precisão (da ordem do milímetro).

A sequência da aplicação desta técnica, quando utilizada para compensar os assentamentos resultantes da escavação de túneis, é a seguinte:

2.1 Instalação da instrumentação

A observação dos efeitos à superfície, causados tanto pela actividade subterrânea como pela injeção "Soilfrac", deverá ser contínua e estará na base do estabelecimento de um programa de injeção eficaz. Aqueles efeitos poderão ser lidos e registados através de vários tipos de instrumentação, nomeadamente, réguas de nível para nivelamento de precisão, marcas topográficas, sensores hidroestáticos, electróníveis e fissurómetros, os quais poderão ser ainda conjugados com instrumentação instalada no interior do solo a tratar, como, por exemplo, inclinómetros, extensómetros e células de pressão.

Mais recentemente, a evolução da tecnologia permitiu a ligação dos sensores hidroestáticos e dos electróníveis a um sistema informatizado, possibilitando a monitorização imediata e contínua dos deslocamentos verticais ocorridos em pontos seleccionados das estruturas protegidas pelo tratamento. Podem-se, assim, obter quer representações bidimensionais e tridimensionais dos

assentamentos e/ou elevações que tenham ocorrido, quer registos dos assentamentos diferenciais originados entre quaisquer pontos de medição.

2.2 Fase de pré-acondicionamento do solo.

Durante o tratamento por injeções múltiplas as propriedades do solo são alteradas, estando as partículas submetidas a um maior constrangimento. No solo tratado, com a estrutura reforçada pelas lamelas de calda de cimento que se vão instalando no seu seio através de injeções múltiplas sucessivas, as tensões horizontais vão aumentando até igualarem as tensões verticais. Quando o solo atinge este estado, é possível então induzir elevações à superfície.

2.3 Fase de pré-elevação das estruturas

As primeiras reacções de elevação servem para demonstrar que, a partir dessa altura, é efectiva a possibilidade de usar futuras injeções na compensação dos assentamentos que venham a ocorrer. Assim, é fundamental a pré-elevação, mesmo que de apenas alguns milímetros, realizada antes de qualquer actividade de escavação subterrânea, pois permite obter um conhecimento prévio mais detalhado do efeito causado à superfície, relacionando-o com o comportamento das estruturas aí existentes.

2.4 Fase de compensação dos assentamentos

A injeção de compensação poderá ser iniciada após as fases de pré-acondicionamento e de pré-elevação estarem concluídas, logo que tenham sido detectados assentamentos à superfície através do controle permanente da instrumentação aí instalada.

Por outro lado, para que se proceda à interpretação dos efeitos e ao estabelecimento de um novo programa de injeções, deverão ser disponibilizadas continuamente as informações provenientes directamente da frente de escavação, a decorrer sob os edifícios em tratamento, por forma a conjugar-se estas informações com os dados provenientes da própria injeção, dos movimentos originados à superfície e dos seus efeitos nas estruturas sobrejacentes (Fig. 3).

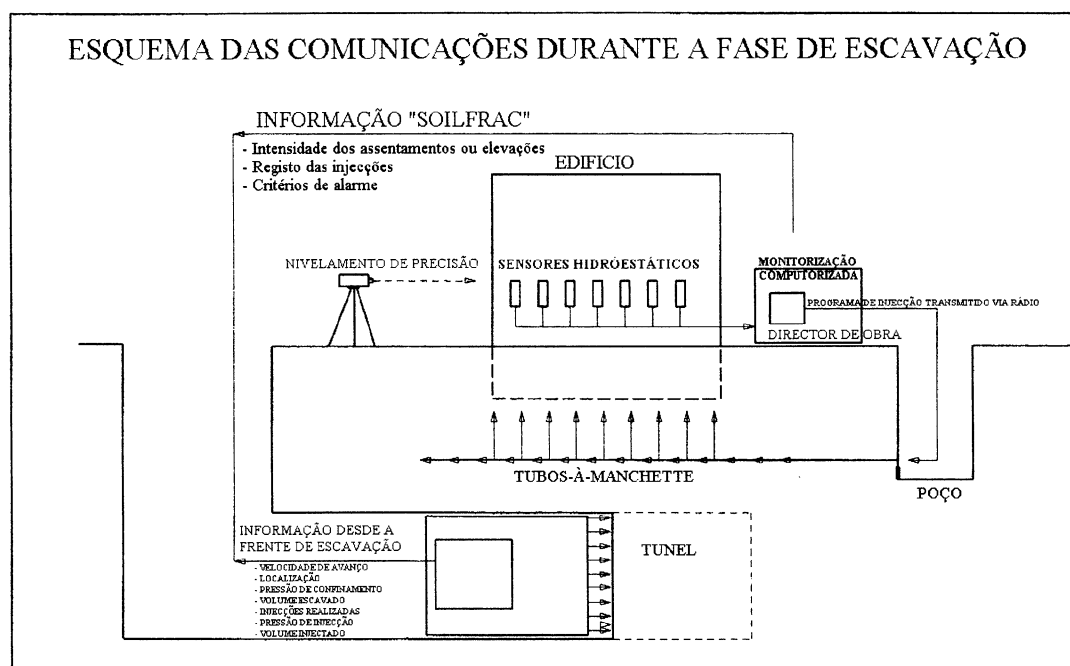


Fig. 3 - Interação entre os dados provenientes da escavação subterrânea e as actividades de injeção à superfície durante a fase de compensação.

3. APLICAÇÃO DA TÉCNICA “ SOILFRAC ” NAS OBRAS DA LINHA BAIXA-CHIADO DO METROPOLITANO DE LISBOA (Fig. 4).

3.1 - Rua 1º de Dezembro

A primeira das três frentes de obra em que se aplicou a técnica da compensação de assentamentos foi efectuada com a finalidade de proteger diversos edifícios antigos, localizados na rua 1º de Dezembro, do efeito dos assentamentos resultantes da escavação de um túnel através de um “escudo” do tipo EPB [5].

O terreno de fundação era constituído por areias siltosas e argilas de baixa resistência, localizado abaixo do nível freático. A distância do topo da escavação à base das fundações era bastante reduzida (8 m) face ao diâmetro do túnel (9.7 m). Havia ainda uma dificuldade adicional resultante de uma transição brusca nas condições de recobrimento do túnel, no sentido da sua progressão. De facto, o tardo dos edifícios a proteger encostava directamente à Colina do Carmo, com um talude quase vertical, pelo que o controlo dos efeitos à superfície devia ser feito continuamente e com

grande precisão, por forma a poder-se ajustar eficazmente os parâmetros da escavação, nomeadamente a pressão no “ escudo ” da tuneladora (Fig.5).

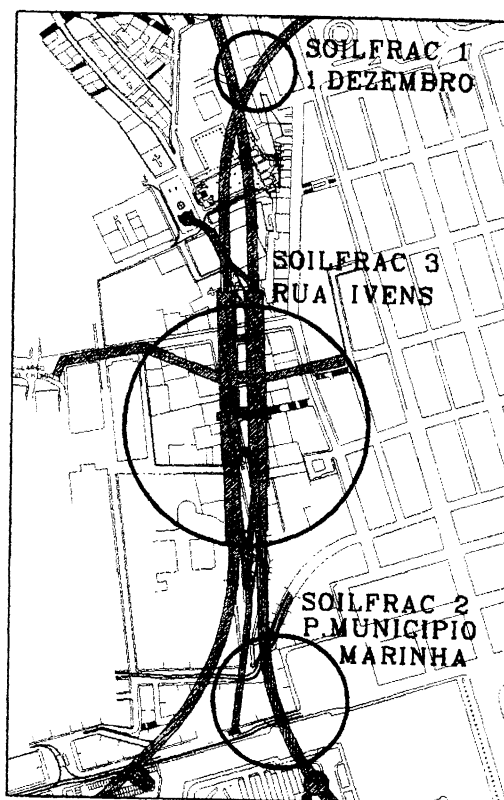


Fig.4 -Localização das áreas sob tratamento de compensação “Soilfrac”.

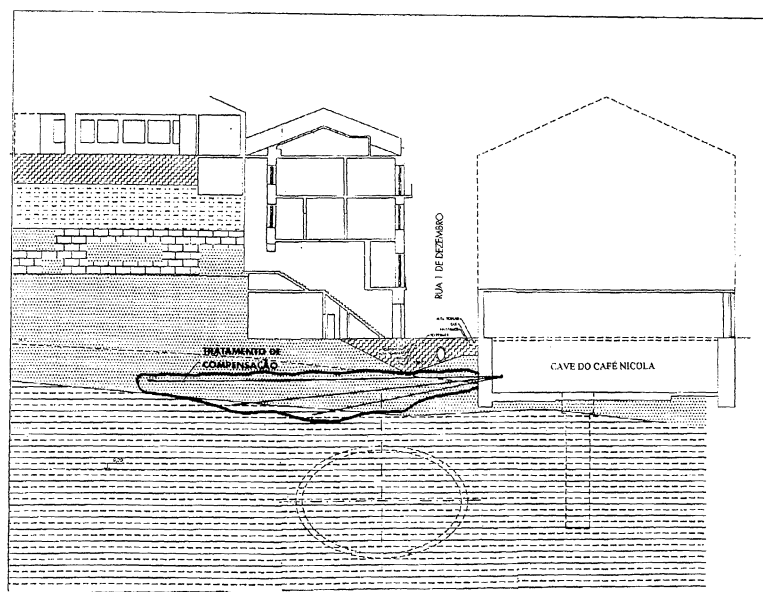


Fig. 5 - Rua 1º Dezembro . Tratamento de compensação. Corte transversal esquemático.

Face às dificuldades previstas, foi assim seleccionado o tratamento de compensação de assentamentos por injeção múltipla “Soilfrac”.

Foi utilizada a cave do edifício do Café Nicola, localizado em frente aos edifícios a tratar, para, a partir dela, furar e instalar os tubos com “manchettes” sob aqueles edifícios.

Para instrumentação dos deslocamentos verticais à superfície utilizaram-se sensores hidroestáticos, posicionados em pontos estruturalmente importantes dos edifícios, estando este sistema ligado a um computador com a possibilidade de registar continuamente os deslocamentos observados.

Após a fase de pré-acondicionamento e antes da passagem da tuneladora, procedeu-se a uma pré-elevação dos edifícios entre 1 a 12 mm.

Com a aproximação da tuneladora e o consequente início da ocorrência de assentamentos, foi iniciada a injeção de compensação, a qual foi mantida durante a escavação do túnel, tendo as distorções angulares sido mantidas em valores bastante inferiores ao máximo admissível que era da ordem de 1:500.

3.2 - Praça do Município / Ministério da Marinha

Esta frente apresentou as seguintes particularidades:

- Escavação de um túnel de 9,7 m de diâmetro (com a tuneladora atrás referida) sob as fundações do Ministério da Marinha e de edifícios da Praça do Município, com um recobrimento muito reduzido (a distância entre a geratriz superior do túnel e as fundações chegou a ser de apenas 3,5 metros!).

- Eixo do túnel no alinhamento do tardo dos edifícios da Praça do Município conduzindo a uma situação tal que cerca de metade daquele localizava-se sob o morro da Calçada de S.Francisco e a outra metade sob os referidos edifícios, gerando, consequentemente, assimetrias na distribuição das tensões na frente de escavação.

- os assentamentos calculados, caso não houvesse qualquer medida de protecção dos edifícios, causariam danos severos nas estruturas existentes à superfície.

- solos interessados pelos trabalhos apresentando grande heterogeneidade - argilas arenosas, areias finas (mais ou menos siltosas) e calcoarenitos (Areolas da Estefânia) - e com o nível freático instalado a cerca de 2,0 m da superfície, com forte influência das marés.

Face aos condicionalismos atrás referidos, foi decidido efectuar ensaios “in-situ”, com o intuito de seleccionar os parâmetros de injeção e analisar os efeitos por ela gerados (Influência da injeção na indução de tensões no solo e respectivas deformações; comportamento dos edifícios sob o efeito da elevação; disposição geométrica dos tubos com “manchettes”; formulação da mistura de injeção; determinação da pressão e caudal de bombagem da calda de cimento).

Esses ensaios exigiram a instalação, tanto no solo como nos edifícios, de uma instrumentação muito detalhada, nomeadamente: sensores hidroestáticos; níveis ópticos; réguas para nivelamento de precisão; electrónveis; células de pressão no terreno; inclinómetros verticais e horizontais; extensómetros múltiplos.

Dos ensaios resultaram as seguintes conclusões:

- a) A influência da calda injectada sentida nas células de pressão no terreno, localizadas à profundidade planeada para o revestimento do túnel, provocou nelas um acréscimo de tensão de 0,1 bar, valor que não fazia perigar as juntas das aduelas.

b) As deformações causadas na estrutura dos solos ocorrentes de granulometria fina estavam relacionadas directamente, para um determinado volume de calda injectado, com o conteúdo desta em material sólido.

c) A ocorrência de calcarenitos, de elevada resistência, implicou alterações na formulação da mistura, na definição de pressões e caudais de bombagens, exigindo ainda a modificação do equipamento de injeção por forma a possibilitar a bombagem de calda com pressões elevadas.

Após a execução deste ensaio, foi instalado o sistema definitivo de injeção a partir de três poços (um no parque de estacionamento do Ministério da Marinha e dois na Praça do Município) de forma a cobrir toda a área a proteger.

Dada a muito pequena distância entre as fundações dos edifícios e o túnel, foi neste caso dada particular atenção à fase de pré-acondicionamento do solo, aqui efectuada com maior intensidade do que nas outras duas frentes.

Na fase de pré-elevação, consecutiva à do pré-acondicionamento, os edifícios foram generalizadamente subidos entre 1,0 e 4,0 mm.

Durante a compensação, as distorções angulares verificadas, tendo também como máximo admissível cerca de 1:500, mantiveram-se em valores extremamente baixos. Para tal certamente contribuiu, quer o cuidado posto no pré-acondicionamento, quer a muito boa coordenação havida entre as equipas responsáveis pela tuneladora e pelas injeções (Fig.6).

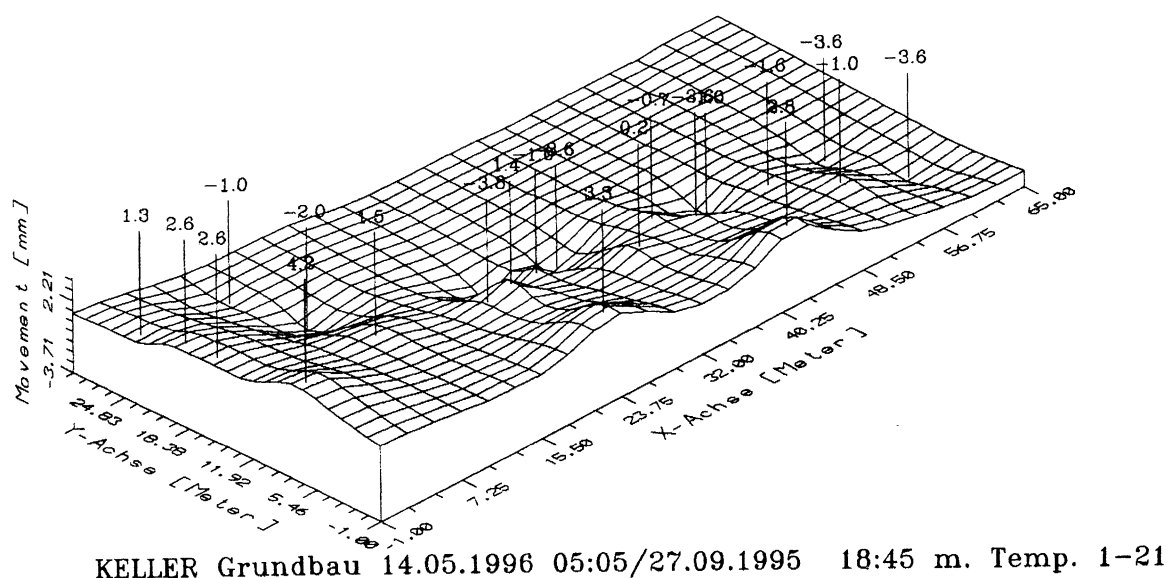


Fig. 6 - Representação tridimensional de deslocamentos verticais na Praça do Município.

3.3. - Rua Ivens

Nesta zona da obra, tratava-se de responder à necessidade de proteger edifícios dispostos ao longo da rua Ivens e da rua Garrett, durante a escavação da galeria poente da estação Baixa-Chiado. Aquela necessidade fizera-se sentir após a escavação da galeria nascente da mesma estação.

A galeria poente, contígua à galeria nascente e, tal como esta, executada pelo método NATM, tem dimensão máxima horizontal e vertical de, respectivamente, cerca de 19 e 14 metros.

Nesta frente, a distância entre o topo da escavação e as fundações dos edifícios variava entre cerca de 15 e 25 metros, tendo a injeção múltipla sido efectuada a profundidades compreendidas entre cerca de 7 e 12 metros, em terrenos constituídos essencialmente por argilas arenosas e areias siltosas, com algumas intercalações de calcarenito, localizados acima do nível freático (Fig. 7).

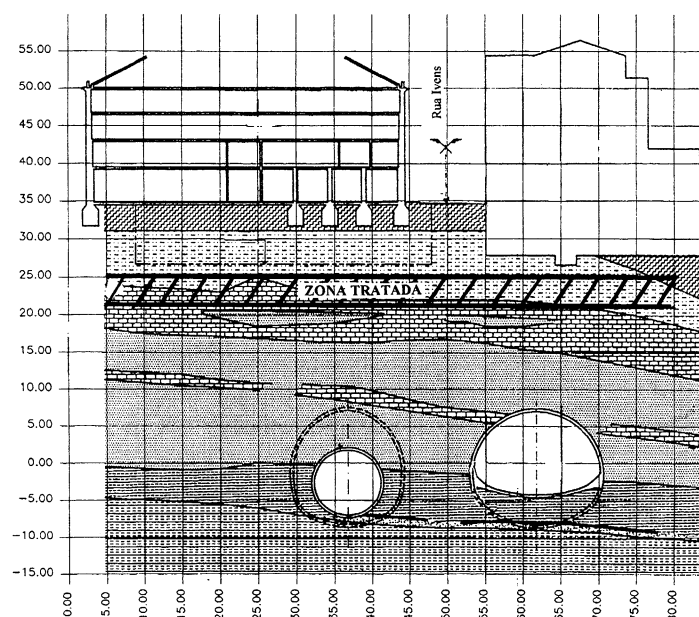


Fig. 7 - Rua Ivens . Tratamento de compensação. Corte transversal esquemático.

Aqui, os aspectos mais relevantes de aplicação do sistema de compensação “Soilfrac” foram os seguintes:

- Área total simultaneamente sob tratamento de cerca de 15.000 m² .
- Instalação dos tubos com “manchettes” a partir de dois poços, localizados na Calçada Nova de S.Francisco e na Calçada do Sacramento, e de uma escavação pré-existente junto ao Largo da Biblioteca.
- Distância máxima de tratamento alcançada a partir de um poço e/ou escavação: cerca de 72 metros.
- 80 aparelhos equipados com sensores hidroestáticos, integrados no sistema computadorizado de registo dos valores observados.

Na área em tratamento foi possível manter, com pequeníssimas variações, o nivelamento inicial, tendo sido observados alguns assentamentos em zonas localizadas, de que resultaram distorções angulares da ordem de metade das admissíveis (cerca de 1:500, como já referido).

4. CONCLUSÕES

As injeções de compensação “Soilfrac” evidenciaram ser um método eficaz na redução de assentamentos totais e diferenciais, nomeadamente em obras de particular dificuldade e complexidade.

Não condicionando em absoluto a aplicação do método, constatou-se que a existência de um sistema informatizado de instrumentação, permitindo a recolha imediata e contínua de dados, é extremamente importante na realização de injeções de compensação para apoio de obras de escavação de túneis, permitindo melhorar os rendimentos e/ou reduzir os riscos de incidentes.

Com base nos resultados obtidos em obras já realizadas com esta técnica, sintetizam-se na Fig.8 os benefícios que ela possibilita (expressos em percentagem aproximada dos assentamentos calculados para a hipótese de inexistência de qualquer tratamento) em função de diferentes níveis da sua aplicação.

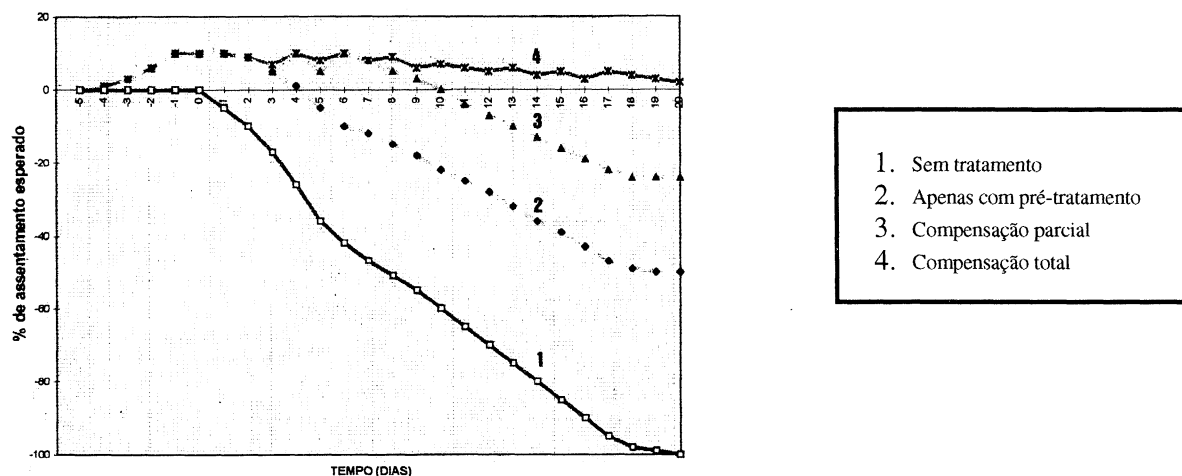


Fig. 8 - Benefícios esperados em função de diferentes graus de utilização da tecnologia “Soilfrac”

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Metropolitano de Lisboa (Dono-de-Obra) e ao Consórcio Ace Metro (Empreiteiro Geral) as facilidades proporcionadas para a apresentação da presente comunicação.

6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Raabe, A.W.; Esters, K.; Soilfracturing Techniques for Terminating Settlements and Restoring Levels of Building and Structures. Ground Improvement (1993), 175 - 192.
- [2] Falk, E.; Kühner, W.; Bell, A.L.; Soilfrac und Soilcrete Zur Baugrundstabilisierung bei Brückenfamenten, Baugrundtagung 1992, Dresden.
- [3] Raabe, E.W.; Esters, K; Injektionstechniken zur Steillsetzung und zum Rückstellen von Bauwerkssetzungen. Baugrundtagung 1986 in Nürnberg Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. Verlag: Wehlmann, Essen.
- [4] Priebe, H and Samol, H (1985); Soilfracturing and Injection method for ground improvement - Proc. 11th Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco.
- [5] Simic,D.; Gittoes, G.; Design of Large Diameter Shield Driven Tunnels for the Southern Extension of the Lisbon Metro. Forschung und Praxis 36/1995: 86 - 92.