

# **TÉCNICAS DE MELHORAMENTO DE SOLOS NA MODERNIZAÇÃO DA REDE FERROVIÁRIA NACIONAL**

## **SOIL IMPROVEMENT TECHNIQUES, FOR THE REFURBISHMENT OF THE PORTUGUESE RAILWAYS NETWORK**

Antunes, José Luiz F. B., *Keller - Portugal, Castanheira do Ribatejo, Portugal,*  
*jose.antunes@keller.pt*

Barros, Pedro Jorge M. A., *Keller - Portugal, Castanheira do Ribatejo, Portugal,*  
*pedro.barros@keller.pt*

### **RESUMO**

Integrados nas diversas fases da Modernização da Rede Ferroviária Nacional, referem-se vários casos em que se recorreu ao melhoramento de solos de fundação pela utilização de várias tecnologias, envolvendo principalmente a vibração em profundidade dos mesmos, com ou sem adição de material. Assim, são descritos aspectos referentes a obras realizadas em diversos locais, envolvendo as técnicas de vibrocompactação e de vibrosubstituição por colunas de brita, (simples e/ou injectadas) e, num caso, de drenagem vertical com geodrenos. São feitas, ainda, referências às situações que ocorrem com mais frequência neste tipo de obras, e às técnicas que são passíveis de concorrer para o melhoramento dos solos de fundação de modernas infraestruturas ferroviárias, incluindo as das linhas de alta velocidade.

### **ABSTRACT**

For the refurbishment of the Portuguese Railways Network various projects were developed in which different soil improvement techniques have been employed, mainly referring to deep vibro techniques. This paper reports to various sites along that network where vibrocompaction, vibroreplacement (stone columns), grouted stone columns and vertical drains (only in one spot) were performed. There are also pointed out the situations that often require the use of those techniques, as well as their importance for founding embankments for modern high speed railway infrastructures.

### **1. INTRODUÇÃO**

Na modernização da rede ferroviária nacional têm surgido situações em que, face ao enquadramento geotécnico e às necessidades de exploração das vias em que se inserem os troços intervencionados, têm vindo a ser adoptadas soluções de melhoria das características dos solos de fundação com recurso, nomeadamente, ao uso de vibradores em profundidade.

Nestas situações, das quais se apresentam alguns casos de obras executadas em Portugal nos últimos 13 anos, a ocorrência de maciços de fracas características mecânicas, incompatíveis com as condições de exploração de vias férreas modernas, com material circulante mais desenvolvido e cada vez com maiores velocidades de operação, conduziu a que fosse aplicada aquela tecnologia, a qual, face aos resultados obtidos, tem provado ser especialmente adaptada para as referidas condições.

## 2. CASOS DE OBRA

### 2.1 Ramal ferroviário do Louriçal – Figueira da Foz (ano: 1993);

Para a construção de um viaduto ferroviário sobre o IC1 – EN109, nas proximidades das fábricas de pasta de papel situadas na Leirosa – Figueira da Foz, foi constatado que o solo de fundação do aterro constituinte de um encontro do viaduto não possuía as necessárias características resistentes de forma a garantir a estabilidade desse aterro.

Tendo-se verificado as características predominantemente arenosas (% finos <5%) dessa fundação, foi prevista a aplicação da técnica de vibrocompactação com recurso a vibradores em profundidade.

Esta tecnologia baseia-se na aplicação em profundidade de forças horizontais que promovem o rearranjo das partículas do solo reduzindo, assim, o seu índice de vazios e, correspondentemente, aumentando a sua compacidade e características geomecânicas, sendo aplicável independentemente da presença do nível freático no solo a tratar. No presente caso o nível freático ocorria a pequena profundidade.

O estado *in situ* da fundação do aterro apresentava um elevado índice de vazios, traduzido numa resistência de ponta média avaliada pelo ensaio CPT (Cone Penetration Test) de  $r_p = 0,05$  a  $0,15$  MPa, correspondendo a características mecânicas incompatíveis com a construção de um encontro em aterro com altura máxima de cerca de 6 metros.

Após um campo de testes inicial, foi definida uma malha de pontos de introdução do vibrador no solo segundo uma distribuição triangular de 2,35 metros de lado tendo-se, em seguida, executado esse tratamento de acordo com os parâmetros então fixados. O controlo de execução deste tratamento foi efectuado por intermédio de ensaios CPT, tendo-se obtido como características finais do solo valores de  $r_p = 0,50$  a  $0,60$  MPa, compatíveis com a utilização do mesmo como fundação do encontro do referido viaduto.

Foi tratada uma área aproximada de  $2.000 \text{ m}^2$ , com profundidades entre os 12 e os 22 metros, totalizando cerca de  $36.000 \text{ m}^3$  de massa de solo tratada.

### 2.2 Variante à Linha do Norte - Substituição da Ponte de Canelas – Aveiro (ano: 1995); [1]

A correcção do traçado da Linha do Norte ao km 283 na zona de Canelas, Aveiro, envolveu a construção de uma nova ponte sobre a Ribeira de Canelas, prolongada sobre aterros de 5 metros de altura fundados em solos aluvionares compressíveis, de matriz quase exclusivamente fina, de muito fracas características mecânicas (valores de SPT entre 0 e 3 pancadas; coesão não drenada,  $c_u$ , entre 20 e 24 kPa), com profundidades máximas da ordem dos 18 metros.

Face à proximidade entre o aterro a construir e o aterro da Linha do Norte, pré-existente, existiria uma sobreposição dos bolbos de tensões dos dois aterros, situação que poderia provocar deformações na plataforma das vias em exploração condicionando a normal utilização das mesmas.

Inicialmente, tinha sido prevista a execução de uma cortina de estacas-prancha em todo o desenvolvimento da variante (800 metros), com vista evitar a interacção daqueles bolbos de tensões. Para aceleração da consolidação estava, ainda, previsto um tratamento por geodrenos verticais.

Em fase de obra foi apresentada, pelo empreiteiro de fundações, uma proposta variante generalizando o tratamento por colunas de brita – inicialmente previsto só para os encontros na nova ponte - a toda a fundação do aterro (Corte-Tipo na Figura 1).

Esta solução permitiu: evitar a execução das estacas-prancha, tendo reduzido as deformações na plataforma em exploração para valores muito baixos e aceitáveis; alterar o faseamento da construção do aterro uma vez que a presença de um solo de melhores características proporcionou uma redução do prazo de execução, sem prejuízo do factor de segurança da obra; diminuir consideravelmente o prazo de consolidação necessário, dada a elevada capacidade de drenagem induzida pelo tratamento efectuado; limitar os assentamentos, reduzindo-os desde 1,0 metro para a solução inicial, até aos cerca de 0,40 metros para a solução variante.

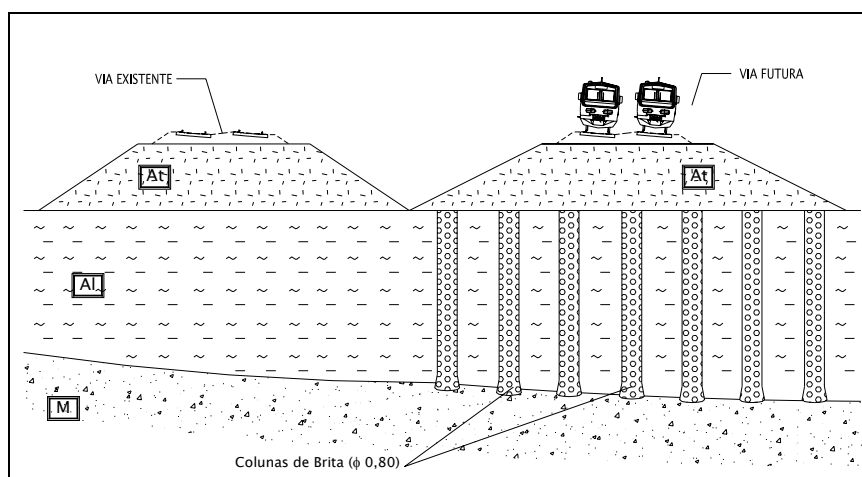


Figura 1 – Corte-Tipo da solução variante

Dada a já referida proximidade da zona onde foi previsto o tratamento e o aterro coroado pela plataforma da Linha do Norte, e de forma a minimizar o risco de interferências com a mesma, optou-se pelo tratamento por vibros substituição (colunas de brita) por “via seca”. No total foram executados cerca de 9.500 metros de colunas de diâmetro médio de 0,80 m, segundo uma malha de distribuição quadrada de 2,5 metros de lado, de acordo com o definido no projecto de tratamento.

Durante e após a execução da obra foi mantida uma estreita observação do comportamento da plataforma da Linha do Norte, tendo os valores dos deslocamentos verificados sido praticamente desprezáveis.

Relativamente à progressão da consolidação e assentamentos do aterro da variante, a mesma foi avaliada com recurso a leituras em marcas superficiais (14 unidades) e inclinómetros (6 unidades). Os valores registados foram da mesma ordem de grandeza daqueles que haviam sido estimados no projecto (cerca de 0,40 metros), tendo os deslocamentos sido registados no período de cerca de 3 meses, conforme inicialmente previsto.

### 2.3 Linha do Sul – Estação de Alvalade do Sado (ano: 2002); [2]

Na Modernização da Linha do Sul, nomeadamente na zona da Estação de Alvalade do Sado (Figura 2), a prospecção geotécnica permitiu identificar a ocorrência de uma camada aluvionar de areias médias, com algum silte, soltas (SPT entre 8 e 13 pancadas; 3 a 10 pancadas do penetrómetro dinâmico pesado; módulo de deformabilidade de 8 MPa), com profundidade máxima da ordem dos 7 metros.

Perante estas características, foi calculado o potencial de liquefacção do solo, a fim de avaliar o seu comportamento em caso de solicitação sísmica.

Uma vez que o valor determinado era incompatível com os critérios de projecto, foi definida uma solução de reforço do solo de fundação pela execução de colunas de brita de diâmetro 0,80 metros, implantadas segundo uma malha de distribuição quadrada de 2,20 metros de afastamento, interessando toda a camada de solo aluvionar pouco compacto. Com este tratamento, foi possível obter um factor de redução das tensões cíclicas de 0,65, cumprindo os objectivos de segurança inicialmente definidos.

Foram executados cerca de 8.100 metros de colunas de brita, envolvendo uma área de tratamento com 700 metros de desenvolvimento e 14 metros de largura, tendo assumido principal condicionante para a execução da obra, a conjugação da execução dos trabalhos de tratamento de solo com a exploração normal da via férrea, que se manteve durante toda a execução do tratamento, com a quase sobreposição dos *gararit* ferroviário e do equipamento de vibrosubstituição.



Figura 2 - Aspecto presente da Estação de Alvalade do Sado

#### **2.4 Linha do Sul – Viaduto de Alvalade do Sado (ano: 2003); [2]**

Para a construção do aterro do encontro Sul do Viaduto de Alvalade do Sado (Figura 3), integrado na Modernização da Linha do Sul, aproximadamente ao km 138, foi identificado um solo de fundação daquele aterro também de fracas características resistentes.

Com base na prospecção existente, esse solo era constituído por materiais aluvionares, de matriz argilo-siltosa com zonas arenosas, com fraca capacidade portante (valores de SPT entre 4 e 8 pancadas; módulo de deformabilidade 2,5 MPa), com profundidades variando entre os 4 e os 9 metros.

Assim, e de forma a garantir a estabilidade durante a construção do aterro do encontro, com uma altura máxima de 8 metros, foi projectada uma solução de tratamento por colunas de brita com diâmetro 0,80 metros, interessando aquela camada compressível, sendo as colunas executadas segundo malhas de distribuição quadradas de 2,25 e 2,60 metros de lado.

No total foram executados cerca de 6.750 metros lineares de colunas de brita numa área de cerca de 5.500 m<sup>2</sup>.



Figura 3 - Aspecto presente do Encontro Sul do Viaduto de Alvalade do Sado

## 2.5 Linha do Norte – Troço Vila Franca de Xira – Azambuja (ano: 2004); [3]

Em termos geotécnicos, os solos ocorrentes nesta obra são genericamente formados por uma camada superficial de aterro com 1,0 a 1,5 metros de espessura, sobrejacente a uma camada de aluvião lodosa de fracas características ( $c_u$  variando entre os 25 e os 30 kPa) com espessura variando entre os 7,5 e os 18 metros. Subjacente a esta aluvião, existe um estrato de argilas siltosas rijas ( $N_{SPT} > 25$  pancadas).

Neste troço, situado entre os pk 33 e 47 da Linha do Norte e inserido na bacia aluvionar do Rio Tejo, foi previsto o tratamento através de geodrenos verticais na quase totalidade dos solos aluvionares de fundação dos aterros destinados ao alargamento da via. As profundidades de tratamento definidas pelo projectista variaram entre os 8 e os 14 metros, permitindo a aceleração dos prazos de consolidação daqueles solos, sob a acção de aterros com alturas máximas de 3 metros.

No total, foram executados cerca de 1,5 milhões de metros lineares (a maior obra deste tipo realizada em Portugal até à data), distribuídos por grande parte da fundação das novas plataformas ferroviárias criadas entre os pk 38 e 45 da Linha do Norte (Figura 4).

A existência, sobre a área a tratar, aproximadamente entre o pk 33+480 e o pk 36+490, de duas linhas de alta tensão dispostas paralelamente ao eixo da via férrea, facultando um pé-direito livre de apenas 10 metros, numa faixa de 8 metros de largura, obrigaram à cravação de geodrenos com recurso a um equipamento munido de uma lança telescópica, dado que a profundidade de instalação era incompatível com aquela limitação. Esta solução foi usada pela primeira vez no nosso país.

Particularmente na zona da futura Estação de Vila Franca de Xira Norte (Figura 5) e Apeadeiro do Carregado, e considerando serem aí as solicitações superiores às originadas apenas pelos aterros (existência dos futuros cais de passageiros), com maiores assentamentos e prazos de consolidação, foi projectado um tratamento por colunas de brita.

Este tratamento foi executado por via seca, com as colunas de brita, de diâmetro 0,80 metros e executadas segundo malhas triangulares de 2,5 e 2,75 metros de lado, atingindo profundidades que foram de 7-8 metros, na estação da Castanheira, e de 19-20 metros, na estação do Carregado. No total foram executados cerca de 24.200 metros lineares. Com esta solução, foram estimados prazos de consolidação de cerca de 4 meses, compatíveis com o faseamento de execução da empreitada.



Figura 4 – Execução de geodrenos verticais no troço junto à Central Térmica do Carregado



Figura 5 – Execução de colunas de brita no Apeadeiro da Castanheira do Ribatejo (futura Estação V. F. Xira Norte)

Os resultados da leitura das marcas instaladas demonstraram que os assentamentos foram da ordem de grandeza dos estimados (0,25 a 0,35 m nas zonas da Estação de Vila Franca de Xira Norte e do Apeadeiro do Carregado), tendo os prazos em que os mesmos ocorreram sido similares aos previstos.

## 2.6 Linha do Norte – Viaduto de Santana do Cartaxo (ano: 2004); [4]

O objectivo do tratamento consistiu em permitir a construção, neste caso, de dois aterros, correspondendo aos encontros Norte e Sul do Viaduto de Santana do Cartaxo, obra inserida no Projecto de Modernização da Linha do Norte.

As zonas a tratar situam-se margem direita do Tejo, na sua zona de baixa aluvionar, sendo os solos compressíveis ocorrentes constituídos por argilas lodosas, moles a muito moles (valores de SPT entre 0 e 2 pancadas, coesão não drenada,  $c_u$ , de 15 kPa), com profundidades variando entre os 2,5 e os 6 metros no Encontro Sul, e os 5 e os 14 metros no Encontro Norte (Figura 6).

O projecto da obra considerou, para garantir a estabilidade da construção desses aterros, a minimização dos assentamentos e o prazo de ocorrência dos mesmos, o tratamento por colunas de brita, de 0,80 metros de diâmetro, interessando a camada compressível, sendo as colunas executadas segundo uma malha de distribuição triangular de 2,20 metros de lado.

No total foram executados cerca de 6.800 metros lineares de colunas de brita. Os assentamentos registados, entre os 0,20 e os 0,30 m, foram da mesma ordem de grandeza dos projectados.

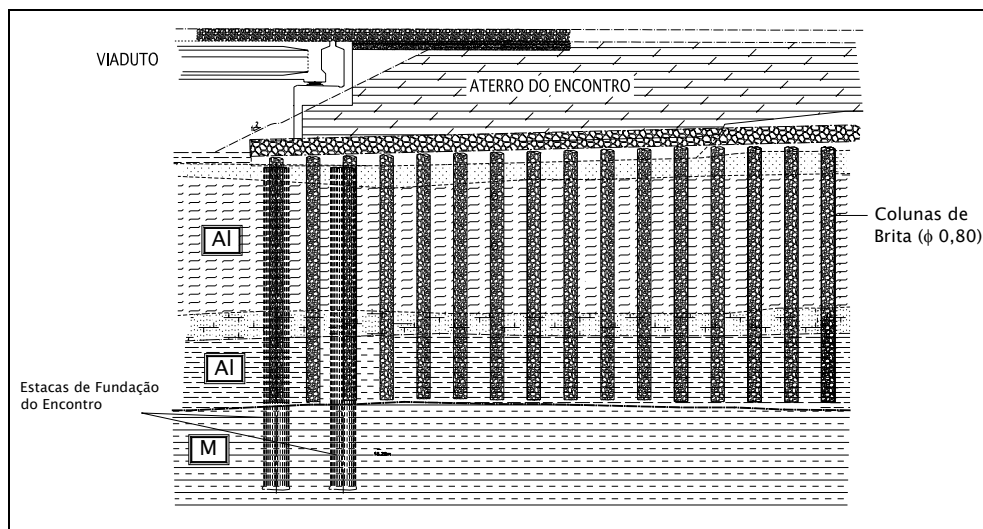


Figura 6 – Corte-Tipo da zona do Encontro Norte, ao pk 59+597

## 2.7 Linha do Norte – Troço Azambuja – Vale de Santarém (ano: 2005) [4].

Também integrado na Modernização da Linha do Norte, no troço Azambuja – Vale de Santarém, entre os pk 47+600 e 65+375 face à ocorrência, ao longo do desenvolvimento deste troço, de solos aluvionares de fracas características mecânicas, foram previstas várias zonas em que foi considerado o tratamento desses solos de fundação, a fim de permitir a construção de novos aterros decorrentes do alargamento ou, em certos casos, a ripagem integral da plataforma da via.

A campanha de prospecção permitiu identificar, de um modo genérico e uma vez que, ao longo do desenvolvimento deste troço existe necessariamente alguma variabilidade nas formações geológicas, uma fundação constituída por:

- Camada superficial de aterro, de reduzida espessura;
- Camada aluvionar, formada por solos de características lodosas, de fracas características resistentes (valores de SPT de nulos a 2 pancadas; coesão não drenada,  $C_u$ , variando entre os 15 e os 50 kPa; resistências de ponta do CPTU geralmente inferiores a 1 MPa);
- Camada Pliocénica constituída por solos granulares, mais ou menos argilosos, com presença de seixos, compacta;
- Camada Miocénica constituída por argilas margosas e areias médias a grosseiras, muito compacta.

Face às solicitações a aplicar aos solos pela construção dos novos aterros (peso próprio; sobrecargas ferroviárias) e uma vez que, pela natureza compressível dos solos aluvionares,

- os assentamentos previstos possuíam magnitudes consideráveis,
- os prazos de consolidação eram elevados, sendo incompatíveis com o prazo de execução da obra,
- os coeficientes de segurança ao deslizamento eram baixos, obrigando a um faseamento da construção dos aterros também incompatível com essa execução,

foi então preconizado o tratamento dessas formações moles pela execução de colunas de brita com 0,80 metros de diâmetro, executadas segundo uma malha triangular de 2,20 metros de espaçamento (ver Figura 7). O dimensionamento desta solução foi realizado pelo método de Priebe, sendo determinados os assentamentos que, com o aumento das características resistentes do solo, seriam expectáveis.

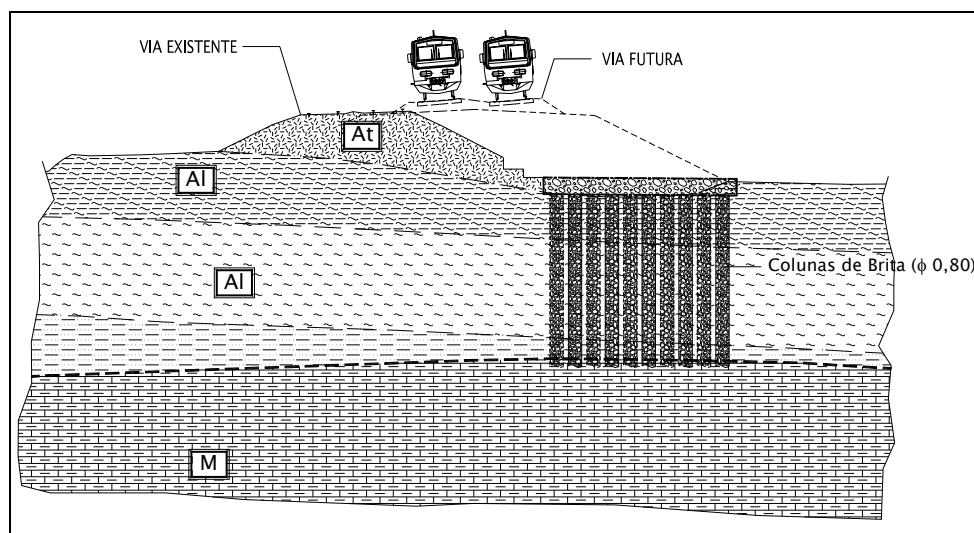


Figura 7 – Corte-Tipo da zona ao pk 53+050

Na zona situada entre os pk 49+500 e pk 50+000, dada a maior altura dos aterros a construir, foi identificada a necessidade de reforçar de uma forma mais acentuada o solo de fundação, assegurando assim o necessário factor de segurança ao deslizamento. Foi, então, adoptada uma solução de tratamento de solo por colunas de brita injectadas com calda de cimento (esquema de execução apresentado na Figura 8), permitindo garantir aquele factor, o que não sucederia com colunas de brita simples.



Este tratamento, sendo formado por colunas de brita compactada com os vazios preenchidos por uma calda rica em cimento, permite elevadas resistências ao corte, semelhantes às de um betão C12/15.

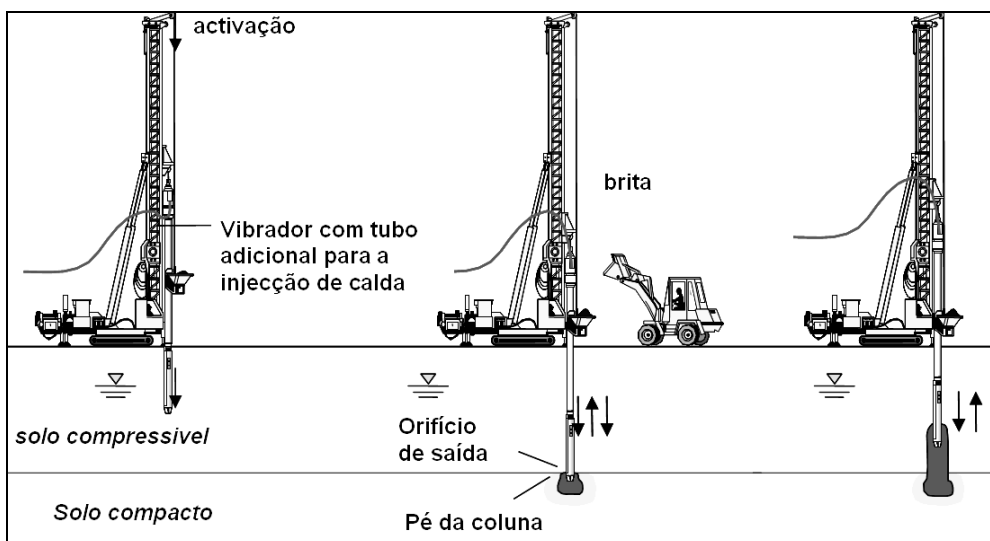


Figura 8 – Esquema de execução das Colunas de Brita Injectadas

A fim de evitar fenómenos de punção daquelas colunas no aterro a construir, bem assim como obter maior economia para a solução final, foram projectadas e executadas as colunas de brita de forma a que os seus 4 metros superficiais fossem simples ou seja, sem que nesse comprimento tivesse sido adicionada a calda de cimento (Corte-Tipo apresentado na Figura 9).

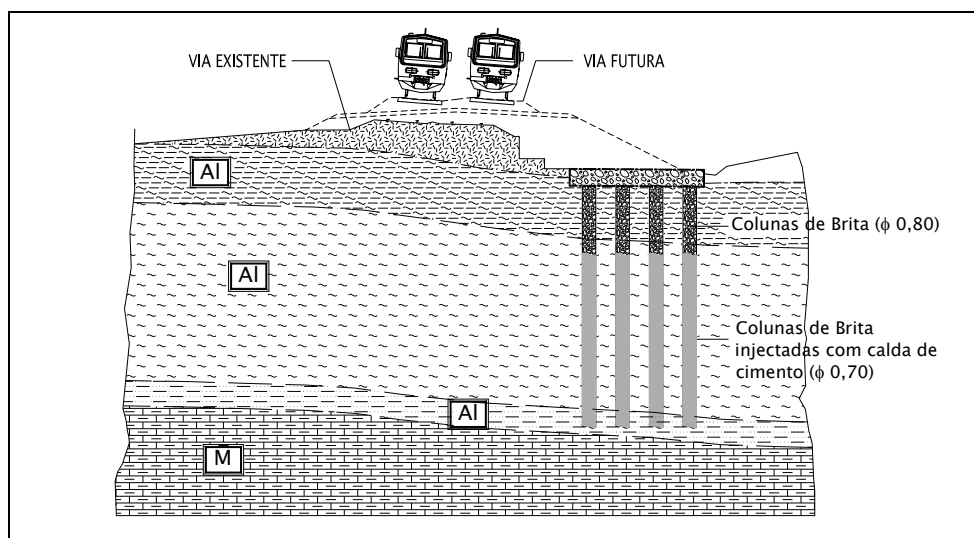


Figura 9 – Corte-Tipo da Zona entre os pK 49+500 e 50+000

Pode-se, de facto, considerar que este tratamento é constituído por colunas bi-módulo (ou semi-injectadas), conjugando as necessidades de rigidez necessárias à segurança do deslizamento com a deformabilidade requerida na ligação à base do aterro.

Na execução desta obra foram executados cerca de 24.500 metros de colunas de brita simples com diâmetro médio de 0,80 m e cerca de 12.300 metros de colunas de brita semi-injectadas (4 metros superiores simples e restante comprimento injectado), com um diâmetro médio de 0,70 metros.

### **3. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Os casos de obra referidos na presente comunicação demonstram que existe já no nosso país experiência acumulada do emprego, bem sucedido, de técnicas de melhoramento de solos na fundação de aterros para a construção de infraestruturas ferroviárias modernas.

Essa experiência, aliás, está em consonância com a verificada em muitos outros países, onde as técnicas de melhoramento de solos são frequentemente empregues com a mesma finalidade, nomeadamente na construção de linhas de alta velocidade. De facto, são nelas utilizadas, em larga escala, as técnicas de vibração profunda de solos (vibrocompactação, colunas de brita, colunas de brita injectadas, colunas bi-módulo) e de “Deep Soil Mixing”, as quais provaram ter a flexibilidade necessária ao tratamento dum largo espectro de solos, em condições de execução muito variadas, assegurando o cumprimento de especificações exigentes.

O facto de estar tão difundida internacionalmente a utilização daquelas técnicas na construção de infraestruturas ferroviárias, só pode ser interpretado como o reconhecimento de que elas são tecnicamente confiáveis e, simultaneamente, economicamente vantajosas.

### **4. REFERÊNCIAS**

[1] Cristóvão, António; Machado, Francisco; Barros, Pedro – *Tratamento de Lodos por Vibrosubstituição (Colunas de Brita) – Variante da Ponte de Canelas, Linha do Norte, Aveiro. Comunicação ao VII Congresso de Geotecnia, Lisboa*

[2] Ferbritas - Profico- *Projecto Lisboa-Algarve, Linha do Sul, Troço Ermidas-Funcheira, Projecto de Execução.*

[3] Coba – *Modernização da Linha do Norte. Trecho V.F. Xira (N) – Azambuja, Projecto de Execução*

[4] Viaponte - *Modernização da Linha do Norte. Subtroço Azambuja – Vale de Santarém, Projecto de Execução*