

TRATAMENTO DE SOLOS ATRAVÉS DE COLUNAS DE JET GROUTING

Ground improvement solutions using jet grouting columns

Alexandre Pinto*

João Falcão**

Francisco Pinto***

José Melo Ribeiro****

RESUMO – No presente trabalho são apresentados os principais critérios de concepção e de execução associados a soluções de tratamento de solos através de colunas de solo cimento, em particular de jet grouting, encabeçadas por plataformas de transferência de cargas (LTP), estas últimas constituídas por aterros reforçados por geossintéticos: geogrelhas biaxiais em polipropileno e geotêxteis de alta resistência.

SYNOPSIS – The aim of this paper is to present the main design and execution criteria related with ground improvement solutions using soil cement columns, mainly jet grouting columns, capped by load transfer platforms (LTP), formed by compacted fills reinforced by geosynthetics: polypropylene biaxial geogrids or high strength geotextiles.

1 – INTRODUÇÃO

O incremento progressivo da utilização das zonas aluvionares, em geral na periferia de centros urbanos, para a construção de novas estruturas e de novas infraestruturas, tem determinado o recurso a novas soluções de tratamento de solos e de fundações que permitam a execução dos trabalhos em condições de segurança, economia e, cada vez mais, de maior previsibilidade de prazo, conforme descrito por Pinto et al. (2005).

Como exemplo, pode ser destacada a margem Norte do rio Tejo, entre aproximadamente o rio Trancão e Santarém, onde as zonas aluvionares chegam a dispor de espessuras de dezenas de metros, sendo a sua resistência geomecânica caracterizada, por vezes, por valores de coesão não drenada inferiores a 20kPa. Estes materiais repousam sobre formações miocénicas, em geral com resistências reduzidas no seu horizonte superior, caracterizadas, frequentemente, por valores de resistência de ponta, obtida através do ensaio CPT (q_c), inferiores a 3MPa.

Em simultâneo e seguindo uma tendência acentuada nos últimos anos, confirma-se que a generalidade dos donos de obra continuam muito sensíveis a soluções seguras, económicas e onde os prazos sejam, não só, reduzidos, mas também respeitados. Neste enquadramento, destacam-se as soluções de tratamento de terrenos recorrendo a colunas de solo cimento, em particular de jet grouting, encabeçadas por plataformas de transferência de carga (LTP), as quais se têm vindo a afirmar como adequadas dos pontos de vista técnico e económico. Comprovando esta tendência, no presente artigo são apresentados exemplos de aplicação deste tipo de solução sob edifícios industriais, plataformas ferroviárias e plataformas rodoviárias.

* Eng.º Civil, JetSJ Geotecnia, Lda.. E-mail: apinto@jsj.pt

** Eng.º Minas, Tecnasol FGE - Fundações e Geotecnia S.A.. E-mail: jfalcao@tecnasol-fge.pt

*** Geólogo, Tecnasol FGE - Fundações e Geotecnia S.A.. E-mail: fpinto@tecnasol-fge.pt

**** Eng.º Civil, ARCO Systems Portugal Lda.. E-mail: jmelor@arcosystems.pt

2 – EDIFÍCIOS INDUSTRIAIS

2.1 – Introdução

A solução apresentada foi adoptada num empreendimento constituído por armazéns industriais, circundados por arruamentos, localizado em Alverca, junto à margem direita do rio Tejo. A área total bruta do empreendimento ascendia a cerca de 93.000m². Atendendo à geologia do local e ao tipo de cargas a transmitir aos terrenos, foi adoptada uma solução para as fundações das estruturas e para o tratamento dos terrenos de fundação dos pavimentos térreos e dos arruamentos que consistiu, genericamente, na realização de colunas de jet grouting, encabeçadas por uma plataforma de transferência de carga. Esta última, formada por toutvenant armado com geogrelhas bidireccionais em polipropileno, conforme apresentado por Maranha das Neves et al. (2004).

O complexo de armazéns é constituído por três edifícios industriais: corpos B, C e D, os quais deveriam acomodar, ao nível do piso térreo, sobrecargas de utilização com o valor de 40kN/m². A sua localização na margem direita do rio Tejo, conjugada com a sua área e com o valor e com o tipo de cargas a transmitir aos terrenos de fundação, condicionadas ainda pelos movimentos de terraplenagem, pelo tipo de utilização dos pisos térreos dos edifícios industriais e ainda pelos próprios edifícios, determinou a opção por soluções de fundação e de tratamento dos terrenos através de colunas de jet grouting, encabeçadas por uma plataforma de transferência de carga. Esta última foi constituída por camadas de toutvenant, armadas com duas geogrelhas bidireccionais. Destaca-se, em particular, o facto dos movimentos de terraplenagem terem determinado a realização de aterros em toda a zona Sul, do lado da margem do rio, a geologicamente mais desfavorável, com altura máxima de 2m, de forma a que os arruamentos e os edifícios, correspondentes aos corpos B e C, pudessem vir a dispor de cotas que os salvaguardassem dos impactos resultantes de situações de cheias no rio Tejo (Figura 1).

2.2 – Condicionamentos de natureza geológica e geotécnica

O dispositivo geológico local foi caracterizado através de uma primeira campanha que consistiu em onze sondagens mecânicas à rotação, associadas à realização de ensaios SPT, com recolha de amostras para classificação macroscópica e para ensaios laboratoriais, em particular: granulometria, limites de Atterberg e edométrico. A referida campanha permitiu detectar a ocorrência de formações miocénicas, recobertas por depósitos aluvionares e por materiais de aterro, os quais, a partir da superfície, foram caracterizados da seguinte forma (Figura 1):

- Materiais de aterro: com espessura variável entre 2,5 e 7,5m, com valores de N_{SPT} inferiores a 10 pancadas.
- Depósitos aluvionares: com espessura variável, aumentando no sentido do rio Tejo, de Norte para Sul, de 1,0m a 4,5m. Os depósitos aluvionares eram constituídos superficialmente por materiais areno-lodosos e argilo-lodosos, com valores de N_{SPT} inferiores a 8 pancadas. Sob estes materiais foram detectados aluviões lodosos, com espessura máxima de cerca de 3m, na extremidade Sul da obra, do lado da margem do rio Tejo, com valores de N_{SPT} inferiores a 2 pancadas.
- Substrato Miocénico: materiais argilo-siltosos, siltes arenosos e areias de granulometria média a fina. A resistência destes materiais aumentava gradualmente com a profundidade. No contacto com os depósitos aluvionares o valor do número de pancadas N_{SPT} obtido foi de 8.

Antes do início dos trabalhos foi ainda realizada uma campanha de prospecção complementar, com o objectivo de efectuar o zonamento das resistências de ponta, de forma a pré-determinar o comprimento das colunas de jet grouting de tratamento dos solos e de fundação da LTP, o qual consistiu na realização de 16 ensaios CPT, tendo sido possível efectuar as seguintes considerações, para cada um dos materiais atravessados (Figura 1):

- Materiais de aterro: valores, em geral, com grande dispersão, comprovando a heterogeneidade destes materiais.
- Depósitos aluvionares: valores muito baixos, por vezes desprezáveis, em particular ao nível dos materiais de natureza predominantemente lodosa.
- Substrato Miocénico: ao nível do horizonte superficial observaram-se valores de resistência de ponta compreendidos entre 2,5 a 3,0MPa. A profundidades variáveis, entre cerca de 1,0 a 3,5m, os valores da resistência de ponta eram incrementados para cerca de 5,0MPa.

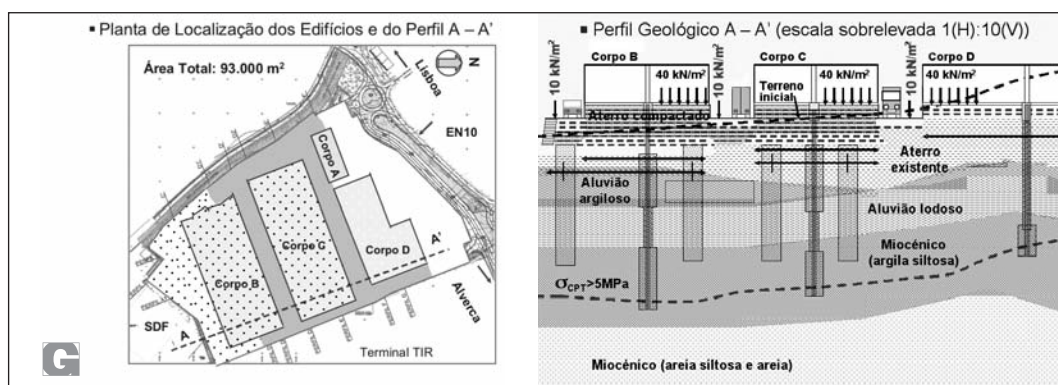


Fig. 1 – Planta de localização do empreendimento e perfil geológico A-A'.

Na análise efectuada foi desprezada, conservativamente, a eventual resistência por atrito lateral ao nível dos materiais de aterro e dos depósitos aluvionares, normalmente consolidados. A resistência ao nível do substrato Miocénico foi ainda previamente avaliada através da realização de um ensaio de carga vertical à escala real, o qual é descrito em 2.5.

2.3 – Condicionamentos relativos ao prazo de execução

A solução adoptada para a fundação e para o tratamento dos terrenos deveria respeitar um prazo máximo de cerca de 6 meses. Este facto, associado à dimensão da obra, determinou a opção por uma solução de maior previsibilidade e que não exigisse a necessidade do pré – carregamento e, essencialmente, da drenagem e consolidação dos depósitos aluvionares.

2.4 – Soluções adoptadas para os edifícios

2.4.1 – Corpos B e C

Estes edifícios, de utilização industrial, dispunham de uma área em planta de 15.025m² e 17.415m², respectivamente, o corpo B e o corpo C, apresentavam estrutura metálica e localização na extremidade Sul do empreendimento (Figuras 1; ver também Figura 11).

As condições geológicas nesta zona, associadas à necessidade de executar aterros em toda a área com altura variável, de Norte para Sul, entre cerca de 1,0 e 2,5m, determinaram o cenário mais desfavorável de todo o empreendimento, tendo, em consequência, sido adoptadas as seguintes soluções (Figuras 1 e 2; ver também Figura 11):

- Fundações das estruturas e do pavimento térreo: colunas de jet grouting de diâmetro e de comprimento variável, em função do valor da carga axial a acomodar, armadas, em todo o seu comprimento, com tubos metálicos de coroa circular em aço de alta resistência. As colunas dispunham de um diâmetro máximo de 1.100mm, compatível com a mobilização de uma tensão de serviço não superior a 2,0MPa, executado nas extremidades superior e inferior, permitindo, respectivamente, a diminuição do vão da plataforma de transferência de carga (LTP) e a transmissão das cargas ao substrato Miocénico por atrito e por ponta. No troço intermédio foram realizadas colunas com diâmetro mínimo de 400mm apenas com a função de protecção do tubo metálico. O comprimento dos três troços variava em função do valor da carga axial a acomodar, sendo o troço inferior realizado sempre no substrato Miocénico.
- Tratamento e fundações do pavimento térreo: colunas de jet grouting com diâmetro mínimo constante de 1.200mm e com entrega mínima no substrato Miocénico compatível com a transmissão de uma tensão máxima em serviço de 1,6MPa, dispondo-se em planta com uma área de influência não superior a 20m².

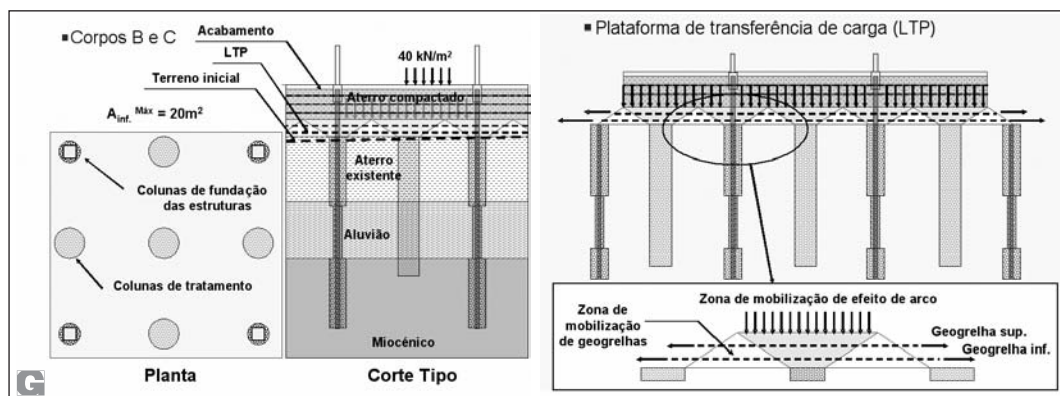


Fig. 2 – Soluções adoptadas nas fundações dos edifícios dos corpos B e C.

Todas as colunas foram encabeçadas por uma plataforma de transferência de carga (LTP) com 75cm de espessura mínima, constituída por toutvenant, armado com duas geogrelhas bidireccionais em polipropileno, com resistência à tracção de 20 e 30kN/m, respectivamente a superior e a inferior. Sobre esta plataforma foi executado um aterro compactado com 1,90m e 1,60m de altura, respectivamente, nos edifícios dos corpos B e C, sobre o qual foi realizado o acabamento final, constituído por uma camada de material granular (toutvenant) e por um massame armado com fibras metálicas, ambos com 0,15m de espessura mínima.

2.4.2 – Corpo D

Tal como os anteriores, o edifício correspondente ao corpo D, de utilização industrial, de uma área em planta de 11.675m² e apresentava estrutura metálica, mas localizava-se na zona Norte do empreendimento. Nesta zona, as condições geológicas associadas à necessidade de realização de escavações em toda a área com altura variável, de Sul para Norte, entre cerca de 1,5 a 3,5m, deter-

minaram um cenário menos desfavorável do que o relativo aos edifícios dos corpos B e C (Figura 1). No enquadramento descrito, foram adoptadas soluções de fundações das estruturas e de redistribuição de cargas / uniformização de assentamentos, esta última motivada pela variação da altura da escavação, face ao valor da sobrecarga actuante no pavimento térreo (Figura 3):

- Fundações das estruturas: colunas de jet grouting de diâmetro e de comprimento variável, em função do valor da carga axial a acomodar, armadas em todo o seu comprimento com tubos metálicos de coroa circular em aço de alta resistência. As colunas dispunham de um diâmetro mínimo de 800mm, compatível com a mobilização de uma tensão de serviço não superior a 2,0MPa, executado na extremidade inferior, permitindo a transmissão das cargas ao substrato Miocénico por atrito e por ponta. No troço superior foram realizadas colunas com diâmetro mínimo de 400mm com função apenas de protecção do tubo metálico. O comprimento dos dois troços variava em função do valor da carga axial a acomodar, sendo o troço inferior realizado integralmente no substrato Miocénico.
- Plataforma de redistribuição de cargas / uniformização de assentamentos: com 60cm de espessura mínima, constituída por toutvenant, armado com duas geogrelhas bidireccionais em polipropileno, com resistência à tracção de 20 e 30kN/m, respectivamente, a superior e a inferior. Sobre esta plataforma foi executado o acabamento final em massame armado com fibras, com 0,15m de espessura mínima.

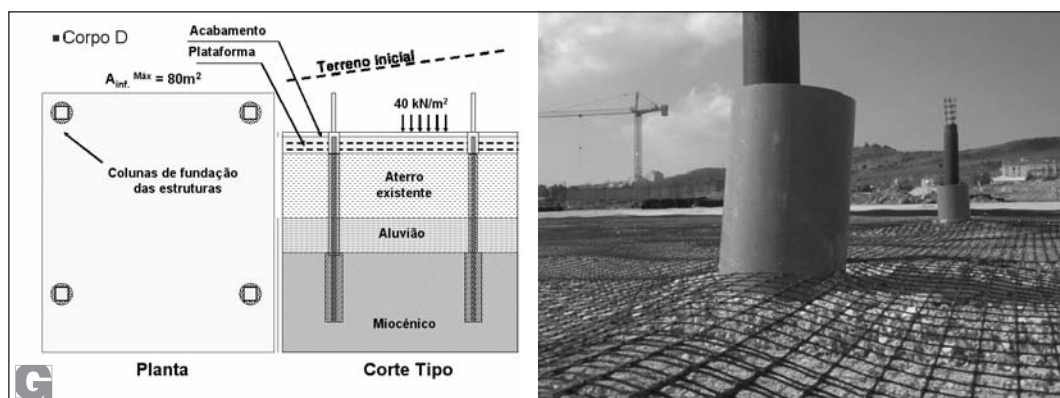


Fig. 3 – Solução adoptada no corpo D e compatibilização entre os tubos e as geogrelhas.

2.5 – Ensaios de carga

2.5.1 – Ensaio de carga vertical

O ensaio de carga vertical foi realizado numa coluna de tratamento e de fundação dos pavimentos interiores dos edifícios, corpos B e C, com diâmetro mínimo constante de 1.200mm, 8,5m de comprimento e localizada na extremidade Sul do empreendimento. O ensaio teve como principal objectivo confirmar a adequação dos principais critérios de concepção e de execução adoptados nas soluções de fundação da LTP, em particular o comprimento de entrega da coluna no substrato Miocénico. O ensaio consistiu na aplicação de quatro ciclos de carga - descarga axial, através de quatro macacos hidráulicos, sendo o valor da força aplicada aferido através de quatro células de carga, colocadas sob cada um dos macacos. No último ciclo de carga o valor máximo da carga aplicada foi de 2.400kN, correspondente a cerca de 1,5 vezes o valor médio de serviço: 1.600kN, correspondente a uma tensão de cerca de 1,4MPa (Figura 5).

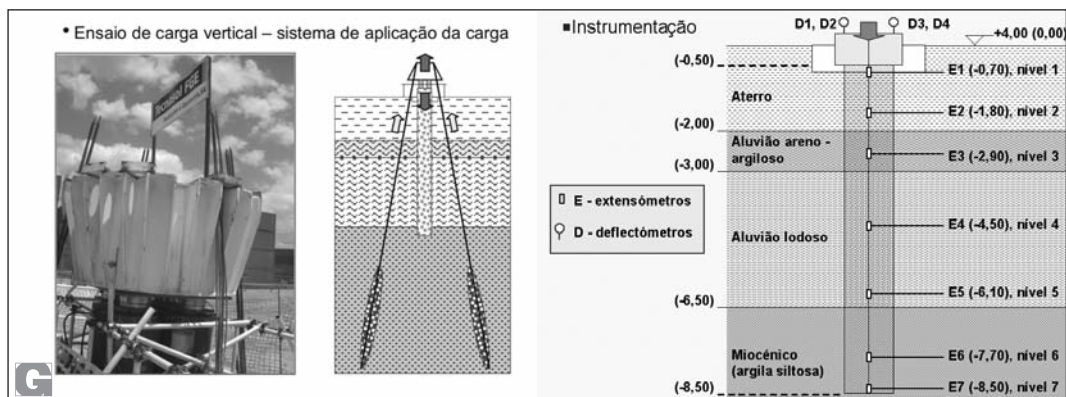


Fig. 4 – Sistema de aplicação de carga, geologia e instrumentação.

A coluna ensaiada foi instrumentada no maciço de encabeçamento com deflectómetros e em profundidade através de extensómetros, localizados a cotas determinadas pela geologia do local. O sistema de reacção foi constituído por uma cabeça metálica, amarrada ao terreno através de quatro ancoragens sub-verticais (Figura 4). No 4º ciclo, a partir da carga de 2000kN, verificou-se um deficiente comportamento do sistema de reacção, em particular de uma das ancoragens de reacção, o que poderá ter determinado a aplicação de carregamentos excêntricos.

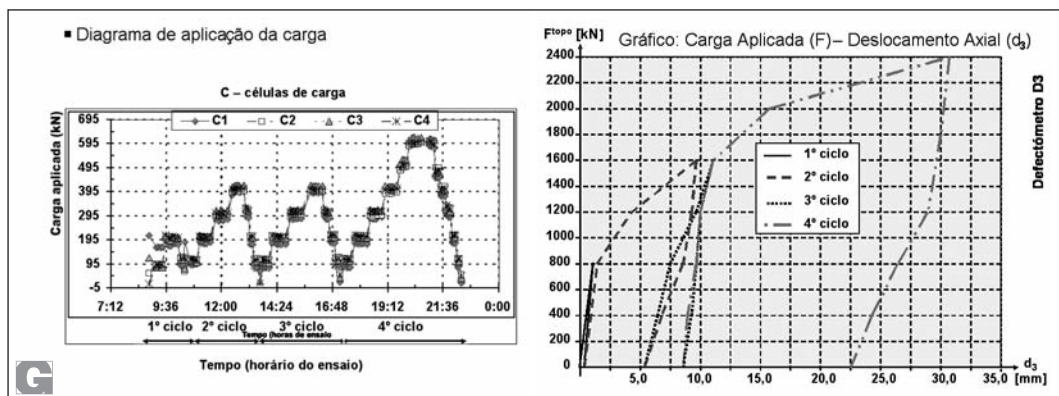


Fig. 5 – Diagrama de aplicação de carga e gráfico carga aplicada – deslocamento axial.

Como principais conclusões deste ensaio podem ser destacados os seguintes aspectos:

- A resposta praticamente elástica da coluna em condições de serviço, até ao 3º ciclo, após a mobilização de um assentamento plástico de valor não superior ao encurtamento elástico teórico da coluna, associado a um efeito de pré-carga, necessário para a mobilização do atrito lateral ao longo do fuste da coluna (Figura 6).
- A importância do comprimento de entrega da coluna no substrato Miocénico, pois para a carga de serviço, 3º ciclo, cerca de metade da carga total terá sido transmitida ao terreno através do atrito lateral mobilizado ao longo do fuste da coluna. Em particular no troço inferior, correspondente à entrega no substrato Miocénico, onde foi mobilizada uma tensão de atrito unitária

rio (q_s) aproximadamente igual a 60kPa (nível 7). Tendo por base o andamento da curva correspondente, admite-se que o valor máximo mobilizável não terá, contudo, sido atingido. Esta situação terá igualmente acontecido na zona do aterro, provavelmente motivada por uma camada de toutvenat pré-existente, embora associada à mobilização de maiores deslocamentos (Figura 6).

- O bom comportamento em termos de fluência, em condições de serviço e em particular no 3º ciclo. O facto de no 2º ciclo o deslocamento de fluência ter sido superior ao observado no ciclo seguinte poderá ser explicado pelo efeito de pré-carga já referenciado (Figura 7).

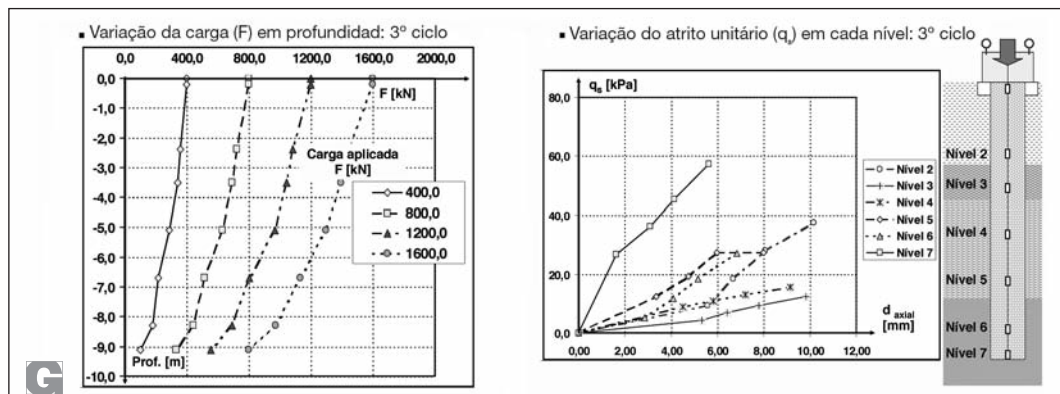


Fig. 6 – Transmissão da carga ao terreno e variação do atrito unitário – 3.º ciclo.

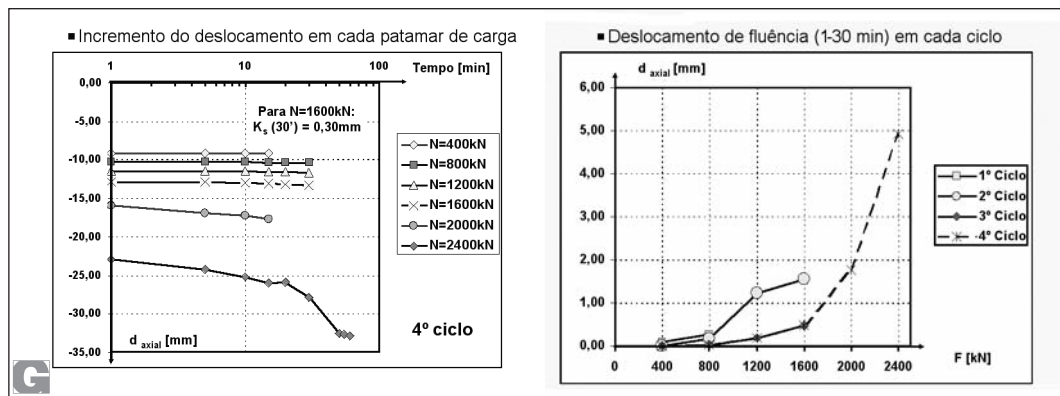


Fig. 7 – Variação da carga em cada patamar e deslocamento de fluência (1-30 min).

2.5.2 - Ensaio de carga horizontal

O ensaio de carga horizontal foi realizado através da aplicação de uma carga simultânea ao maciço de encabeçamento de cada uma das duas colunas ensaiadas, determinando a sua divergência e reacção mútua. As colunas ensaiadas encontravam-se localizadas na zona Sul do empreendimento, correspondente ao futuro interior do edifício do corpo B (Figura 1):

- Coluna C1 de tratamento e de fundação dos pavimentos: com diâmetro mínimo constante de 1.200mm e com cerca de 8,0m de comprimento total.

- Coluna C2 de fundação dos edifícios e dos pavimentos térreos: com diâmetro de 1.000mm nos troços superior e inferior e de 400mm no troço intermédio, respectivamente, com 4,0, 5,0 e 1,5m de comprimento, perfazendo um comprimento total de 10,5m. Esta coluna foi armada em todo o seu comprimento com um tubo metálico TM-80 com 139,7mm de diâmetro exterior e 9,0mm de espessura de parede.

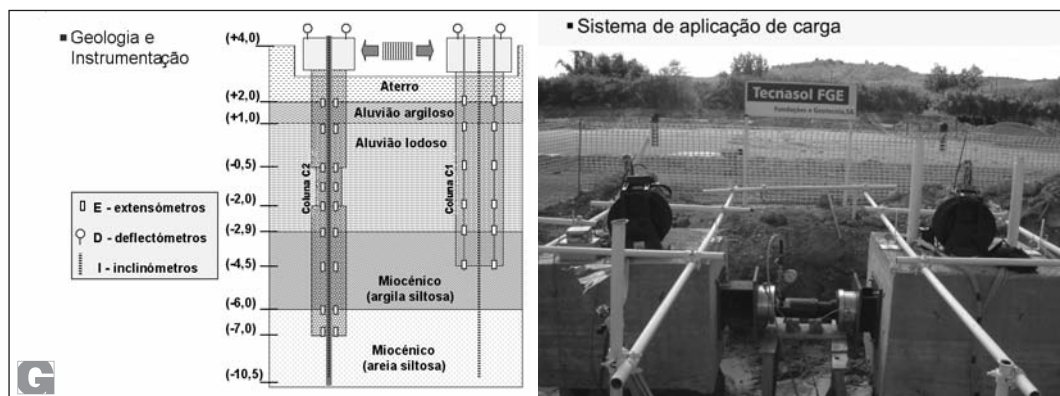


Fig. 8 – Geologia, instrumentação e sistema de aplicação de carga.

O principal objectivo do ensaio era o de confirmar a adequação dos principais critérios de concepção e de execução adoptados nas soluções de fundação da LTP e dos edifícios, em particular a capacidade de resistência ao corte e à flexão das colunas, quando solicitadas por acções sísmicas. O ensaio consistiu na aplicação estática de um ciclo de carga - descarga, através de um macaco hidráulico, sendo a força aferida através de duas células de carga, colocadas em cada extremidade do macaco. O valor máximo da carga horizontal aplicada foi de 180kN, correspondente a cerca de duas vezes o valor de serviço estimado: 83kN, actuando numa área de influência em planta de cerca de 20m². O referido valor máximo terá sido condicionado pela colocação de uma união do tubo TM, localizado no interior da coluna C2, a cerca de 3m de profundidade, assim como pela ocorrência de intensa pluviosidade nos dias que antecederam o ensaio, saturando os terrenos superficiais.

As duas colunas foram instrumentadas, no respectivo maciço de encabeçamento, com deflektómetros e em profundidade através de extensómetros, localizados a cotas determinadas pela geologia do local, e ainda através de uma calha inclinométrica (Figura 8).

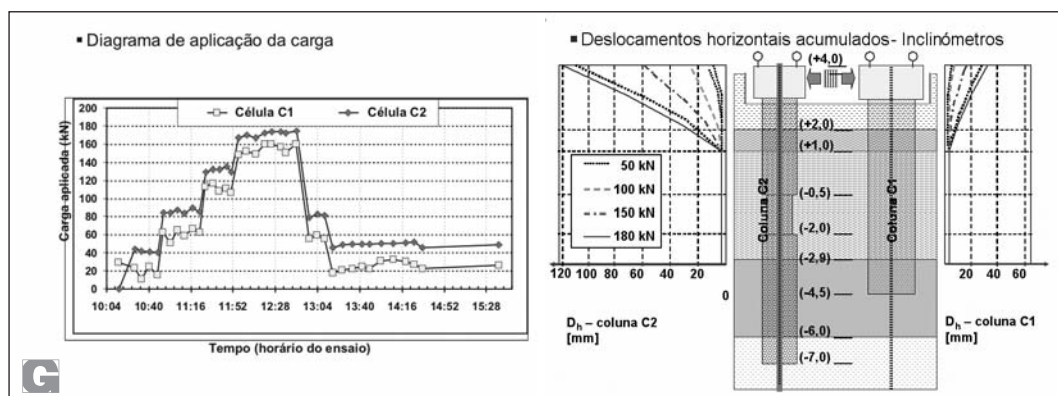


Fig. 9 – Diagrama de aplicação de carga e de deslocamentos horizontais acumulados.

Como principais conclusões do ensaio podem ser destacados os seguintes aspectos:

- A confirmação da adequação das características resistentes e geométricas das colunas para as condições de serviço, em particular da coluna C1, concebida para suportar a plataforma de transferência de carga e garantir o confinamento dos materiais lodosos quando submetidos a solicitações de natureza sísmica (Figura 9). Numa situação real, seria ainda de prever que o comportamento das colunas pudesse vir a ser beneficiado pelo efeito de compressão determinado pelas cargas verticais transmitidas pelos elementos suportados, permitindo a diminuição das tensões de tracção devidas à flexão.
- Confirmou-se a importância de evitar que os tubos metálicos acomodem forças horizontais que possam determinar esforços de corte e de flexão excessivos. Quando tal for imperativo, deverá ser minimizado o número de uniões entre troços de tubo, ou deverão serem adoptadas as uniões exteriores (Figura 10).



Fig. 10 – Seccionamento da coluna C2 e vista da configuração da superfície de rotura.

Na Figura 11 são apresentadas fotografias da execução da plataforma de transferência de carga no corpo B, assim como o resumo das principais quantidades de todos os trabalhos de tratamento de solos, terraplenagens e betão armado realizados.



Fig. 11 – Execução da LTP e resumo das principais quantidades.

3 – PLATAFORMAS FERROVIÁRIAS

Na extremidade Sul da mesma obra, empreendimento em Alverca, e a poucos metros da Linha do Norte, foi efectuado um ensaio de carga à escala real com o objectivo de simular o comportamento de uma plataforma ferroviária, apoiada sobre uma plataforma de transferência de carga (LTP),

fundada em colunas de jet grouting. Atendendo à amplitude das ações ferroviárias, assim como à área da plataforma, $(7+7) \times (5+5) \text{ m}^2$, a LTP foi fundada sobre uma malha de nove colunas de jet grouting com 1200mm de diâmetro e resistência à compressão de 4,0MPa, encabeçadas por capitéis com 2500mm de diâmetro, de forma a permitir o incremento dos vãos entre colunas. A coluna central dispunha de uma área de influência de 35 m^2 , o que torna a solução competitiva em cenários em que os terrenos a tratar apresentem grande espessura. Devido aos vãos entre as colunas, a LTP foi executada com 2,7m de altura, tendo sido reforçada inferiormente por duas camadas de geotêxtil tecido de alta resistência, com resistências de, respectivamente, 200kN/m a inferior e 100kN/m a superior. Ao nível superior o reforço foi realizado através de duas camadas de geogrelhas bi-direcionais, embebidas em toutvenant, com resistências de, respectivamente, 30kN/m a inferior e 20kN/m a superior. A opção pela uso simultâneo de geotêxteis, com funcionamento de membrana, e de geogrelhas, mobilizando o interbloqueio com o toutvenant, foi determinado pelo vão entre as colunas. A plataforma foi instrumentada com marcas topográficas a várias profundidades e de superfície, 4 células de pressão no coroamento da coluna central e 1 inclinômetro (Figura 12).

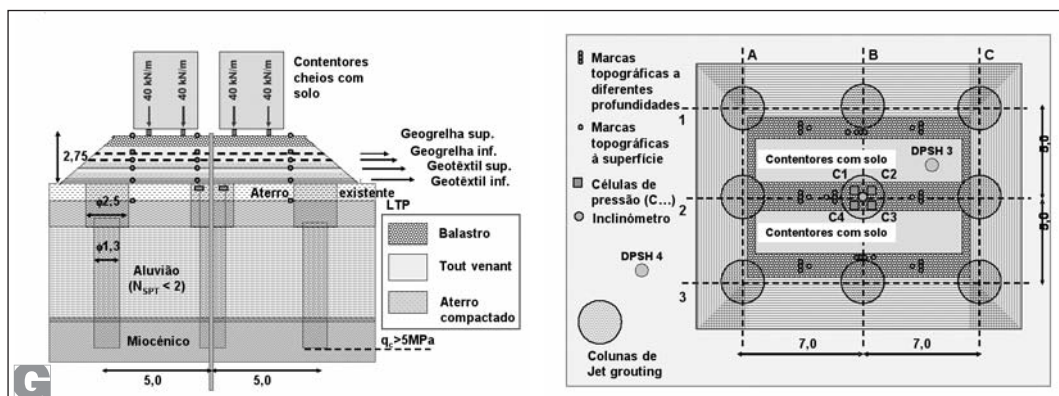


Fig. 12 – Seção transversal tipo e planta da plataforma ferroviária experimental.

A plataforma foi carregada pelo seu peso próprio e por uma carga estáticamente equivalente à sobrecarga ferroviária regulamentar de 40kN/m por carril. Na simulação desta carga foram adoptados dois pares de contentores, dispostos paralelamente como se fossem dois comboios, encheidos com solo, de forma não simultânea de modo a simular, numa fase inicial, um carregamento excêntrico, e apoiados em perfis metálicos em aço laminado com secção HEB240, simulando carris, devidamente travados entre si (Figura 13).



Fig. 13 – Vista da colocação da última geogrelha e da instalação dos perfis HEB.

Cerca de um mês após o carregamento da plataforma com os contentores simulando a sobrecarga ferroviária, correspondente ao estacionamento de dois comboios regulamentares durante este intervalo de tempo, o ensaio foi interrompido por razões associadas ao plano de trabalhos da obra, o qual previa a realização, na zona do ensaio, de um parque de estacionamento automóvel. Nesta data, foi possível efectuar as seguintes constatações:

- O assentamento máximo com a sobrecarga ferroviária a actuar como carga permanente não ultrapassava os 30mm, com tendência aparente para a estabilização. Este valor era já substancialmente inferior ao estimado através da teoria da consolidação. Após a retirada dos contentores foi mesmo observada uma ligeira tendência para a recuperação das deformações (Figura 14).

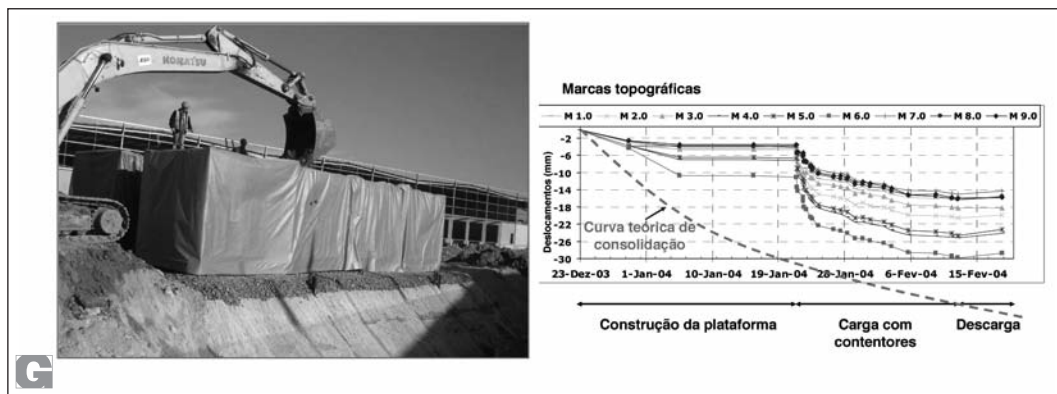


Fig. 14 – Enchimento de contentores e assentamentos observados na plataforma ferroviária.

- O carregamento excêntrico inicial, apenas com os contentores de um dos lados do aterro, não afectou o comportamento da plataforma.
- Os assentamentos verificados apresentavam, independentemente do seu valor total máximo, uma grande tendência para a uniformidade (Figura 15).

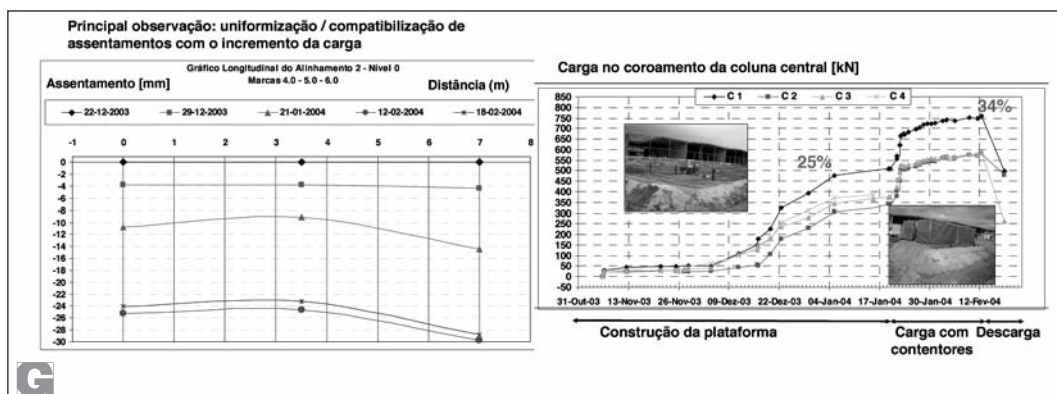


Fig. 15 – Assentamentos à superfície - alinhamento 2 e carga no coroamento da coluna central.

- A carga máxima medida no coroamento da coluna central foi de apenas 34% do valor máximo teórico, aferido através da respectiva área de influência (Figura 15), admitindo-se que

a carga remanescente tenha sido transmitida directamente para o terreno confinado pelas colunas. De forma a confirmar esta hipótese, foi efectuada uma campanha de ensaios penetrométricos, do tipo super pesado (DPSH), a qual confirmou que o terreno localizado entre as colunas apresentava uma resistência cerca de três vezes superior à do terreno localizado exteriormente às colunas (Figura 16).

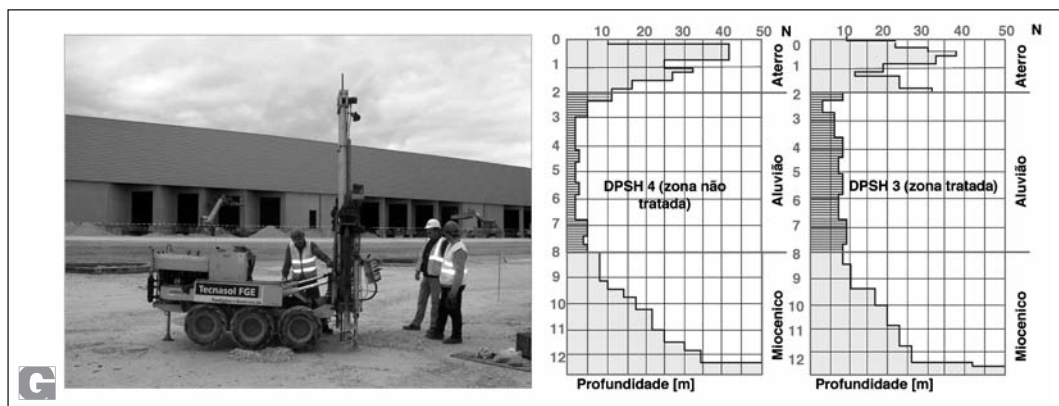


Fig. 16 – Execução e resultados dos ensaios DPSH.

Embora a duração do ensaio tenha bastante inferior ao desejável, foi possível constatar algumas semelhanças com os resultados apresentados por Zanzinger e Gartung (2002), no mesmo tipo de ensaio, mas desenvolvido num intervalo de tempo de 7 anos, 1994-2001, confirmando assim a adequação deste tipo de solução. Destacando-se o reduzido valor das deformações e o facto destas se verificarem, na sua quase totalidade, durante a fase construtiva da obra.

4 – PLATAFORMAS RODOVIÁRIAS

O mesmo tipo de solução foi igualmente estudado para um aterro de aproximação a um viaduto rodoviário, com cerca de 7m de altura máxima e fundado na baixa aluvionar do rio Tejo, numa zona em que os materiais aluvionares chegam a dispor de uma espessura média de cerca de 40m. Assim, sob uma camada superficial com cerca de 5,5m de espessura de argilas lodosas e lodos, verificou-se a presença de formações aluvionares, normalmente consolidadas, predominantemente arenosas, por vezes siltosas, de granulometria variável, com tendência para o aumento de elementos grosseiros e da resistência com a profundidade. Considerou-se assim que este cenário seria compatível com o tratamento do terreno localizado entre a superfície e a camada aluvionar de matriz arenosa, através de colunas de solo cimento, dimensionadas para acomodar a totalidade do peso do aterro e as sobrecargas rodoviárias, tendo, neste caso, sido estudadas duas soluções (Figuras 17, 18 e 19):

- Colunas de deep mixing – via húmida, as quais são formadas a partir da mistura mecânica, materializada através de ferramentas agitadoras, de uma calda ligante, em geral de cimento, com o solo. No enquadramento descrito, as cargas correspondentes ao peso próprio do aterro e às sobrecargas rodoviárias seriam transmitidas às formações arenosas de compactidade média, caracterizadas por resistência de ponta aferida através dos ensaios CPTU, superior a 2,5MPa, e com espessura mínima de 3m. Neste contexto, as colunas de solo cimento seriam executadas ao abrigo da tecnologia de deep mixing, com 800mm de diâmetro mínimo, tendo sido dimensionadas para acomodar uma tensão de serviço não superior 1,25MPa, correspondente a uma carga unitária máxima de cerca de 625kN.

- Colunas de jet grouting, formadas a partir da mistura hidráulica de cimento com o solo, antecedida da pré-desagregação do mesmo solo. No cenário descrito, as cargas correspondentes ao peso próprio e às sobrecargas rodoviárias seriam transmitidas às formações arenosas de compactidade média, caracterizadas por resistência de ponta aferida através dos ensaios CPTU superior a 5,0MPa. Neste contexto, as colunas de solo cimento executadas ao abrigo da tecnologia de jet grouting, com 1200mm de diâmetro mínimo e dispo de um capitel com 2500mm de diâmetro, foram dimensionadas para acomodar uma tensão de serviço não superior 2,2MPa, correspondentemente a uma carga unitária máxima de cerca de 2.500kN.

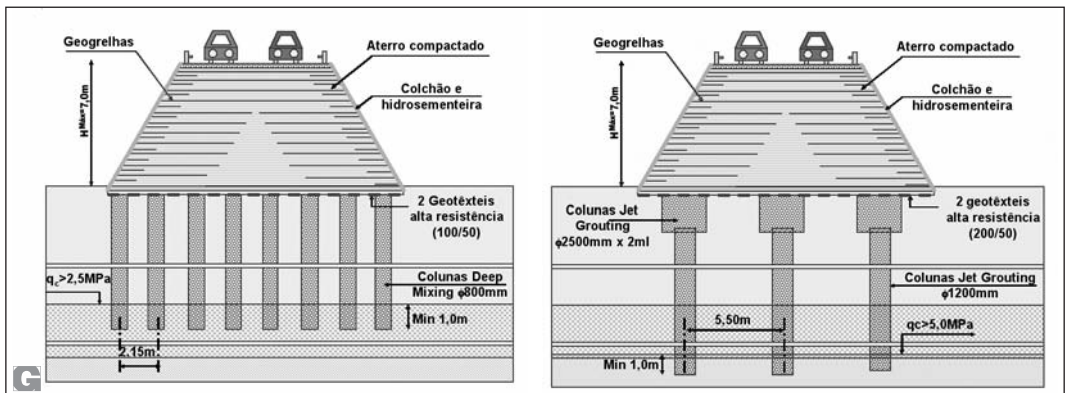


Fig. 17 – Plataforma rodoviária: sobre colunas de deep mixing e de jet grouting – secção tipo.

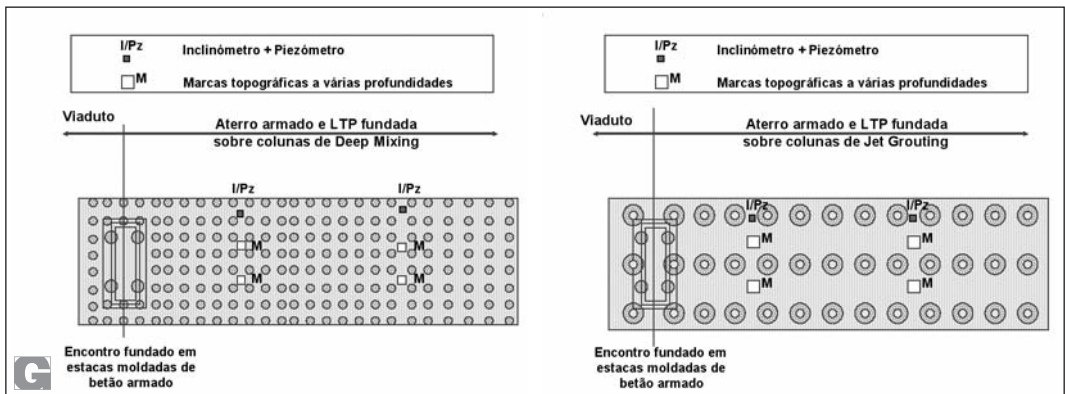


Fig. 18 – Plataforma rodoviária sobre colunas de deep mixing e de jet grouting - planta.

Comparativamente com a solução de tratamento do terreno de fundação por colunas de deep mixing, a solução com recurso a colunas de jet grouting apresentava uma maior exigência ao nível da plataforma de transferência de carga, pois os vãos entre colunas seriam superiores, e ainda do seu comprimento total. Este último, em virtude da maior exigência das características geomecânicas dos terrenos onde se deveria localizar a base das colunas de jet grouting, uma vez que estas trabalhariam a valores de tensão superiores (Figuras 17, 18 e 19).

No que se refere à plataforma de transferência de carga, a construir na base do aterro, esta seria construída através de 2 camadas ortogonais de geotêxteis tecidos de alta resistência. Para o corpo do aterro, com altura superior a 2m, foi proposto que o mesmo, incluindo os respectivos taludes, fosse

armado através de geogrelhas uniaxiais em polipropileno e devidamente fundado sobre o terreno, previamente tratado através das colunas de solo cimento. O revestimento dos taludes contra os efeitos da erosão, motivados pela localização em zona de cheias, seria efectuado através de colchões constituídos por grelhas flexíveis em polietileno, devidamente articulados com as geogrelhas que asseguravam o reforço do aterro e ainda com o revestimento exterior através hidrosementeira. Este último, incrementaria a protecção contra a erosão e, sobretudo, garantia a integração paisagística. Esta solução seria compatível com inclinações dos taludes até cerca de 70° com a horizontal, permitindo, sobretudo, uma redução substancial da largura da base do aterro e, consequentemente, da área de terreno a tratar.

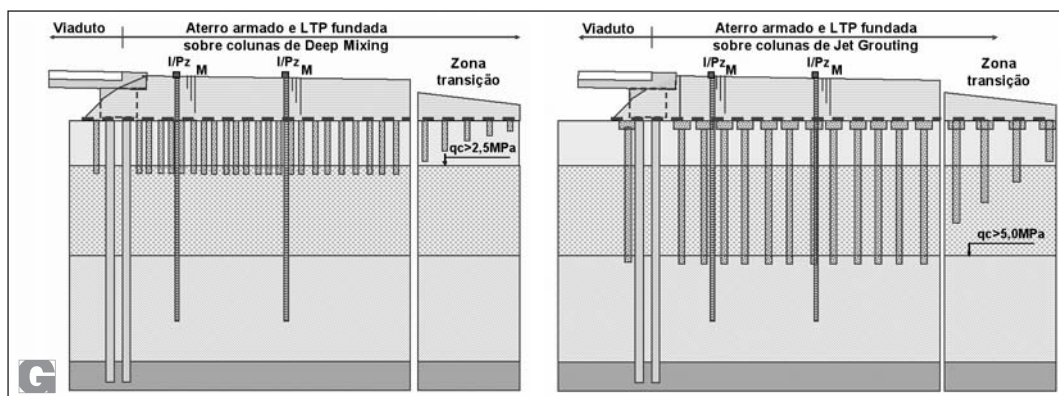


Fig. 19 – Plataforma rodoviária: sobre colunas de deep mixing e de jet grouting – alçado.

Nas zonas de transição para o viaduto, onde a altura máxima do aterro atingia cerca de 7m, e de transição para o troço de aterro de altura inferior a 2m e sem tratamento de fundação, foram propostas, respectivamente, soluções de maior densidade de colunas e de colunas com comprimento sucessivamente menor (Figura 19).

5 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

A soluções descritas permitem comprovar a flexibilidade e a previsibilidade das soluções de fundação e de tratamento de terrenos com recurso a colunas de solo cimento, encabeçadas por plataformas de transferência de carga, constituídas por materiais de aterro, armados com geogrelhas ou com geotêxteis tecidos de alta resistência. Neste contexto, considera-se assim importante destacar os seguintes aspectos relacionados com este tipo de soluções (Figura 20):

- Permitem a diminuição do número de apoios, comparativamente com outras soluções de reforço de solos, como as que recorrem a microestacas ou a estacas cravadas.
- Permitem a dispensa do recurso a mecanismos de drenagem e de consolidação, muito menos previsíveis do ponto de vista de prazo e de comportamento, como acontece com as soluções que recorrem a colunas de britas ou a geodrenos.
- Permitem a construção das plataformas de aterro com a mobilização de pequenos assentamentos, devendo os mesmos ocorrer, essencialmente, na fase construtiva, a quando da entrada em carga da LTP. O tratamento do terreno de fundação poderá ser realizado através de colunas de solo cimento, executadas através das tecnologias de jet grouting ou de deep

mixing, que por trabalharem a tensões de compressão baixas e mobilizarem atritos unitários elevados não apresentam grande exigência nas condições de fundação, podendo, consequentemente, dispor de comprimentos totais otimizados.

- Permitem o confinamento do solo entre colunas e a mitigação de vibrações, factor importante em plataformas ferroviárias, conforme descrito por Holm et al. (2002).
- Permitem a realização de zonas de transição para estruturas rígidas, como é o caso de viadutos, ou para zonas onde não se considere necessária a realização do tratamento.
- Pela sua importância na optimização e no ajuste das soluções aos condicionamentos existentes, destacam-se, em fase de projecto, a necessidade de uma boa caracterização geológica e geotécnica dos terrenos a tratar, assim como, em fase de preparação de obra e de obra, a realização de ensaios de carga à escala real, a instrumentação da LTP e o controlo de execução das colunas de solo cimento, através do registo contínuo dos respectivos parâmetros de execução.

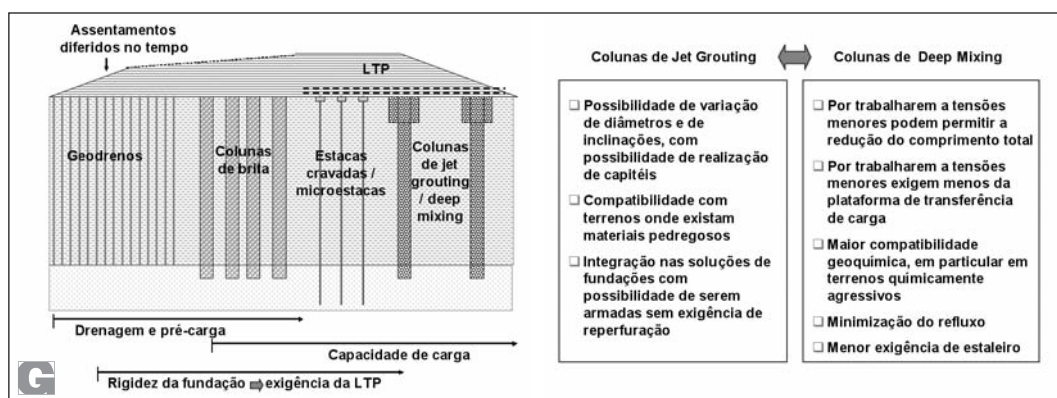


Fig. 20 – Análises comparativas entre soluções de tratamento de solos.

- Com o objectivo de combinar as vantagens das soluções de jet grouting e de deep mixing podem, actualmente, ser citadas as tecnologias híbridas como o “swing” e o “jacksman”, descritas por Moseley e Kirsch (2004), que permitem a realização do alargamento das colunas de deep mixing através de corpos de solo cimento, com a geometria de argola, materializados através da tecnologia de jet grouting (Figura 21).

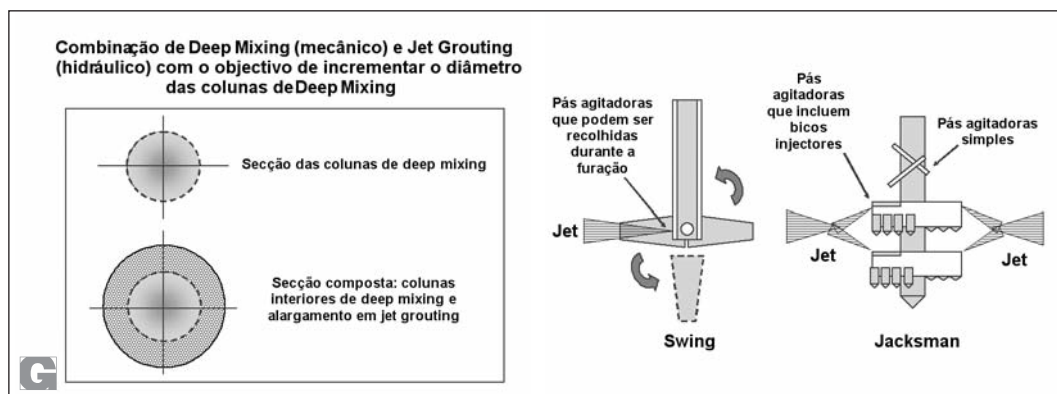


Fig. 21 – Tecnologias híbridas de solo cimento associando o jet grouting ao deep mixing.

Como referido no início do presente artigo, as soluções descritas embora ainda pouco estudadas e, sobretudo, pouco aplicadas em Portugal apresentam vantagens, em particular ao nível da segurança e da previsibilidade dos prazos de execução. Estas vantagens deverão certamente ser avaliadas a quando das oportunidades de aplicação das mesmas, em particular no âmbito dos projectos que se perspectivam, no curto a médio prazo, no domínio das infraestruturas ferroviárias e aeroportuárias, a construir sobre solos aluvionares moles.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Dono da Obra, relativa ao empreendimento em Alverca, a permissão para a divulgação do presente artigo.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Holm, G; Andréasson, B.; Bengtsson, P. E; Bodare, A. e Eriksson, H.; *Mitigation of Track and Ground Vibrations by High Speed Trains at Ledsgard, Sweden*. Swedish Deep Stabilization Research Centre – Report 10, 2002.
- Maranha das Neves, E.; Oliveira, C.; Pinto, A.; Pinto, F.; Falcão, J.; Cebola, D.; Vaz, I. e Melo Ribeiro, J. *Tratamento dos Terrenos de Fundação do Alverca Park*. 9.º Congresso Nacional de Geotecnia, Aveiro, pp. 517-526 - Vol. III, Casos de Obra, 2004.
- Moseley, M. P. e Kirsch, K. *Ground Improvement*. 2nd edition, Spon Press, 2004.
- Pinto, A.; Falcão, J.; Pinto, F. e Melo Ribeiro, J. *Ground Improvement Solutions using Jet Grouting Columns*. 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, pp. 1249 – 1252, Volume 3 – 2a: Ground Improvement, 2005.
- Zanzinger, H. e Gartung, E. *Performance of a geogrid reinforcement railway*. Geosynthetics – 7th ICG – Delmas, Gourc & Girard (eds), pp. 381-386, 2002.