

SOLUÇÕES DE FUNDAÇÕES INDIRECTAS NO COLÉGIO PEDRO ARRUPE - PARQUE DAS NAÇÕES

DEEP FOUNDATION SOLUTIONS AT THE PEDRO ARRUPE SCHOOL - PARQUE DAS NAÇÕES

Pinto, Alexandre, *JetSJ Geotecnia Lda., Lisboa, Portugal, apinto@jetsj.pt*

Albuquerque Nuncio, João, *JetSJ Geotecnia Lda., Lisboa, Portugal, joao.nuncio@jetsj.pt*

Tomásio, Rui, *JetSJ Geotecnia Lda., Lisboa, Portugal, rtomasio@jetsj.pt*

Morais Sarmiento, Miguel, *Alves Ribeiro, Lisboa, Portugal, miguel.sarmiento@alvesribeiro.pt*

Neves, Miguel, *Alves Ribeiro, Lisboa, Portugal, miguel.neves@alvesribeiro.pt*

Peixoto, Artur, *Geo-Rumo - Tecnologia de Fundações S.A., artur.peixoto@georumo.pt*

RESUMO

No presente artigo são descritos os principais critérios de concepção e de execução adoptados nas soluções de fundações indirectas dos diversos blocos constituintes do Colégio Pedro Arrupe, em Lisboa. Os principais condicionalismos, de natureza geológica e geotécnica, caracterizam-se pela presença de uma camada de aterros recente, com uma espessura média de cerca de 5m, a qual apresentava elementos resultantes da demolição de estruturas em betão armado, pré-existent no local, recobrimo uma camada de solos aluvionares lodosos muito moles, em toda a área do lote, com cerca de 5m a 25m de espessura, repousando, por sua vez, sobre o substrato Miocénico competente. Este cenário geológico e geotécnico condicionou a necessidade de recorrer a uma solução de fundações indirectas versátil, constituída por painéis de solo-cimento, executados através da tecnologia de cutter soil mixing (CSM), armados com perfis metálicos do tipo HEB. É ainda apresentada a concepção de uma solução de estabilização de um talude recorrendo às tecnologias de jet grouting e CSM.

ABSTRACT

The aim of this paper is to present the main design and execution criteria of the deep foundation solutions adopted at the Pedro Arrupe School, in Lisbon. The main constraint was the complex geological scenario composed of a top layer of recent landfills, with around 5m of average thickness and also filled with the remains of old concrete structures, resting over a 5m to 25m thickness layer of very soft muddy alluvium. Those alluvium soils rest directly over the Miocene bedrock. The geological scenario, along with the foundation requirements of the school buildings, led to the design and execution of a versatile deep foundation solution, which consisted on steel profiles, placed inside soil-cement panels, performed through the cutter soil mixing technology (CSM). A slope stabilizing solution in the same site, using CSM and jet-grouting technology, is also presented.

1. INTRODUÇÃO

No presente artigo são apresentadas as soluções propostas e executadas para os trabalhos de fundações indirectas, realizados no âmbito da execução dos dez blocos constituintes do Colégio Pedro Arrupe, em construção em Lisboa, no extremo Norte do Parque das Nações, junto à margem Sul do Rio Trancão e adjacente ao Aterro Sanitário de Beirolas, ocupando uma área de

cerca de 72.000m². Parte do recinto localiza-se no espaço onde existiu anteriormente uma Central de Compostagem, demolida previamente à Expo 98, em 1996 (Figuras 1 e 2).



Figura 1- Vistas Aéreas do Local da Obra, Prévia e ao Início das Obras (2009) e na Fase Anterior à Expo98 (1996)

As soluções definidas no Projecto de Arranjos Exteriores determinaram igualmente à remoção parcial de um aterro, o qual dispunha da função de contraforte estabilizador do Aterro Sanitário de Beirolas, pelo que foi igualmente concebida uma solução de estabilização que compensasse a escavação parcial do referido contraforte (Figura 3). No âmbito do acompanhamento dos trabalhos de execução das fundações indirectas, são ainda descritos os principais condicionamentos e dificuldades enfrentados do decorrer desta complexa obra.



Figura 2 - Fotomontagem Aérea e Planta do Colégio, com a Identificação dos Vários Edifícios / Blocos

2. PRINCIPAIS CONDICIONAMENTOS

2.1 Geologia e Geotecnia

Os principais condicionamentos de natureza geológica e geotécnica caracterizam-se pela presença de uma camada de aterro recente, com uma espessura média de cerca de 5m, a qual apresenta elementos resultantes da demolição de estruturas em betão armado, anteriormente existentes no local, sobreposta a uma camada de lodos (com valor médio de N_{SPT} de 1 pancada), com cerca de 5m a 25m de espessura, recobrendo, por sua vez, o substrato Miocénico competente, constituído, predominantemente, por materiais de natureza calcária (Quadro 1). Este cenário geológico-geotécnico condicionou a necessidade de recorrer a uma solução de

fundações indirectas, constituída por painéis de solo-cimento, executados através da tecnologia de CSM, armados com perfis metálicos do tipo HEB.

Quadro 1 - Valores Estimados dos Parâmetros de Cálculo Adoptados na Modelação do Terreno e das Soluções

	γ [kN/m ³]	ν [-]	C_u [kN/m ²]	ϕ' [°]
Aterro (ZG1)	17	0,3	0	25
Aluvião (ZG2)	16	0,3	41	0
Miocénico (ZG3)	19	0,3	150	35
Colunas de jet grouting	21	0,3	800	40
Painéis de CSM	21	0,3	800	40

2.2 Geometrias dos Blocos a Edificar

O colégio Pedro Arrupe é constituído por 10 blocos independentes, com geometria e volumetria variáveis. Os blocos B4 e B5, os de maior volumetria, são constituídos por 3 pisos elevados e apresentam os planos de cargas mais condicionantes, em termos de acomodação de acções horizontais de natureza sísmica, em particular no caso dos núcleos de elevador. Devido à sua maior rigidez, estes elementos determinaram uma solução de fundações particularmente mais exigente, nomeadamente, com a capacidade de resistir a momentos flectores, os quais, por sua vez, originam reacções de tracção na base dos núcleos, particularmente em caso de ocorrência de sismo.

A solução de fundações incorpora igualmente as vigas de fundação, sobre as quais crescem os pilares da estrutura. As referidas vigas funcionam ainda como apoio às lajes de piso térreo dos Blocos. A opção por uma laje estrutural no piso térreo, constituída por vigotas pré-esforçadas e abobadilhas cerâmicas, foi determinada pelas muito fracas características geomecânicas dos aterros e, sobretudo, dos materiais aluvionares subjacentes.

2.3 Condições de Vizinhança

O recinto do Colégio é confrontado por arruamentos, a Norte e a Poente, e pelo aterro sanitário de Beirolas, a Sul e a Nascente. No canto Sudeste do recinto, existe um contraforte constituído por um aterro com espessura adicional de cerca de 7m, o qual foi executado de modo a confinar e estabilizar o Aterro Sanitário de Beirolas. Os blocos B3 e B4 encontram-se parcialmente localizados sobre a implantação deste contraforte, pelo que foi necessário verificar as consequências da remoção parcial do aterro que materializa o mesmo contraforte (Figura 3).

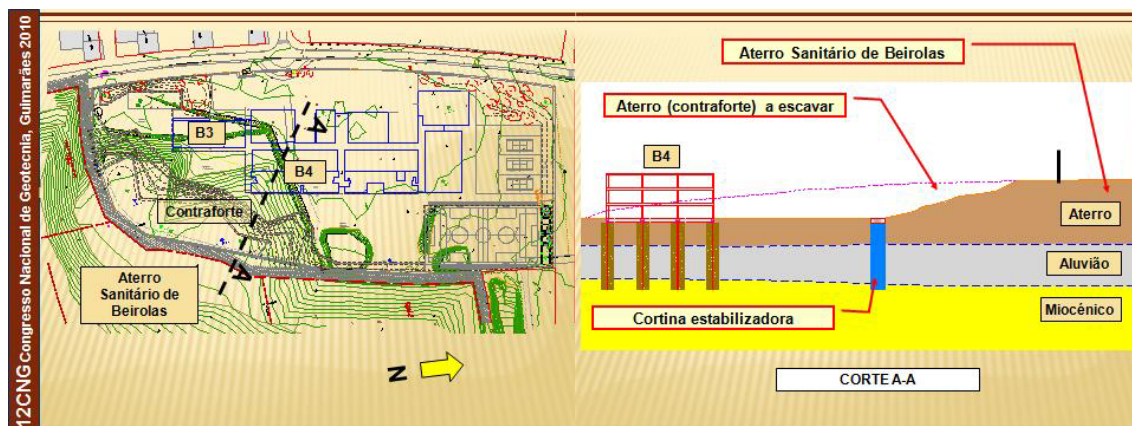


Figura 3 - Localização dos Blocos B3 e B4 face ao contraforte, e corte esquemático A-A

2.4 Prazo de Execução da Obra

A obra teve início em Outubro de 2009, devendo a mesma estar concluída até Setembro de 2010, pelo que as soluções propostas e implementadas deveriam permitir a consecução deste importante objectivo.

3. PRINCIPAIS SOLUÇÕES

3.1 Fundações Indirectas

Tendo por base o cenário geológico do local da obra, assim como a amplitude e o tipo de cargas a transmitir às fundações, foi proposta e implementada a realização de uma solução de fundações indirectas por painéis de solo - cimento, executados através da tecnologia cutter soil mixing (CSM), derivada do deep soil mixing, armados com perfis metálicos, do tipo HEB. Estes elementos acomodam a totalidade das cargas axiais a transmitir às fundações e são encabeçados por maciços em betão armado que, por sua vez, são contraventados por vigas de fundação, igualmente em betão armado. Estas vigas servem ainda de apoio aos pavimentos térreos, realizados através de lajes aligeiradas com abobadilhas cerâmicas, de forma a assegurar que as cargas provenientes de todos os elementos estruturais e não estruturais dos edifícios são transmitidas, em condições de segurança, ao substrato Miocénico (Figuras 4 e 5).



Figura 4 - Execução dos Maciços e Vigas de Fundação e da Laje do Piso Térreo

A tecnologia CSM consiste basicamente numa mistura mecânica entre o ligante, em geral cimento, e o solo. A ferramenta de furação, corte e mistura é análoga à adoptada na tecnologia de execução de paredes moldadas com recurso a hidrofresa, sendo constituída por duas rodas de corte, especialmente vocacionadas para a escavação em aterros pedregosos, solos aluvionares moles, e formações miocénicas muito rijas (Ameratunga, 2009), (Wheeler, 2009), (Simon, 2009). Esta tecnologia não permite, contudo, o atravessamento de peças de betão armado de grande volumetria e densidade de armaduras que se encontrem embebidas nos aterros. Nas situações em que tal sucedeu, o faseamento construtivo associado à solução foi naturalmente adaptado, em particular revelou-se necessário proceder a pré-escavação para remoção prévia dos referidos obstáculos. A solução de fundações adoptada constituiu assim na execução de painéis de solo-cimento, através da tecnologia CSM (com secção de $2,4 \times 0,5 \text{ m}^2$), com comprimento total compatível com os critérios de encastramento nas formações miocénicas previamente definidos, acomodando uma tensão de compressão, para cargas de serviço, não superior a 1,0MPa, e dispondo de um valor do módulo de deformabilidade não inferior a 500MPa (Figuras 5 e 6).

Atendendo à agressividade do terreno envolvente foi adoptado em todos os elementos de solo – cimento, cimento pozolânico. Como já referido, os painéis foram armados com perfis metálicos, os quais foram, por sua vez, dimensionados para acomodar as cargas axiais de compressão e, sobretudo, as de tracção, estas últimas devidas, em particular, à acção sísmica. O facto dos perfis se localizarem no interior dos painéis, permitiu incrementar o respectivo confinamento ao nível dos materiais aluvionares, assim como a sua protecção contra eventuais fenómenos de encurvadura e de corrosão, estes últimos determinados pela agressividade do terreno envolvente.

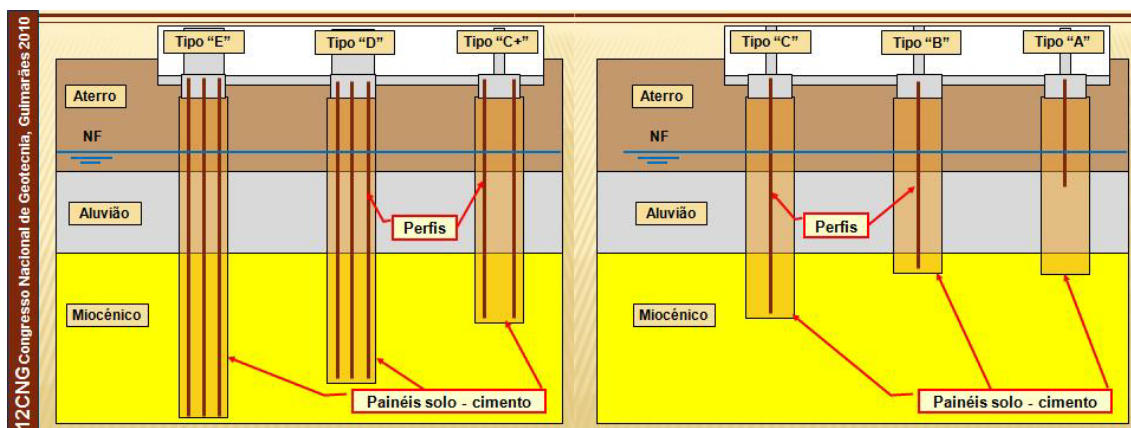


Figura 5 - Cortes Tipo das Soluções de Fundações Propostas

A solução adoptada permitiu tirar o máximo partido da capacidade dos equipamentos na optimização das características de aderência dos painéis de CSM e dos perfis metálicos do tipo HEB no substrato Miocénico. Os valores de cálculo estimados para os principais parâmetros adoptados no dimensionamento foram os seguintes:

Quadro 2 - Valores de Cálculo Adoptados no Dimensionamento das Fundações

Interface	Atrito unitário [kPa]
CSM - Miocénico	150
Aço - CSM	400



Figura 6 - Equipamento e Execução de Painéis de CSM

No âmbito da tecnologia adoptada destaca-se a capacidade de controlo de execução rigoroso por parte do equipamento, o qual permite monitorizar e corrigir, em tempo real, o avanço das rodas de corte, bem como a injeção do ligante e a verticalidade do painel, caso venha a existir algum desvio durante a execução deste.

A referida monitorização é possível em qualquer instante das operações de avanço descendente e ascendente das rodas de corte, dispondo o manobrador do equipamento de um completo painel de instrumentos, o qual permite um controlo automático de todos os parâmetros de furação, injeção de fluidos e mistura do ligante (Figura 7).

Como forma de confirmação dos parâmetros resistentes dos painéis de CSM finais, foram recolhidas amostras destes imediatamente após a execução, as quais serviram para a realização de ensaios de compressão uniaxial, não confinado, com medição do módulo de deformabilidade, os quais confirmaram, em geral, a obtenção dos parâmetros resistentes definidos na Fase de Projecto (Figura 7).



Figura 7 - Painel de Aparelhos para Controlo de Execução e Provetes para Ensaios de Compressão Uniaxial, Não Confinada, com Medição de Módulo de Deformabilidade

3.2 Fundações de Passadiços Exteriores

O projecto de Arquitectura contempla ainda uma rede de passadiços, com cobertura ajardinada, a interligar os blocos do Colégio. A solução de fundações indirectas concebida para os pilares destes passadiços, consiste, atendendo ao tipo e valor das cargas transmitidas pela estrutura, em microestacas cravadas. Estas microestacas foram armadas com varões de diâmetro de 25mm, os quais permitem a compensação da eventual perda de secção face a fenómenos de corrosão, assim como verificação da respectiva verticalidade e reforço das zonas de junta entre os vários troços dos tubos que materializam as microestacas.

3.3 Estabilização do Contraforte

De forma a avaliar os efeitos da escavação parcial do contraforte anexo ao Aterro Sanitário de Beirolas, foram efectuadas análises da estabilidade global de perfis transversais recorrendo-se aos programas de cálculo automático SLIDE e PLAXIS. O primeiro permite determinar, em termos de equilíbrio limite, para um conjunto de superfícies de deslizamento pré-definidas, o valor do coeficiente de segurança associado à potencial superfície de deslizamento crítica (Figuras 8 e 9). As análises foram realizadas pelo Método de Bishop simplificado, tendo por base as informações disponíveis relativas aos condicionamentos geológico - geotécnicos (Quadro 1) e aos parâmetros de resistência dos painéis de solo-cimento. Complementarmente, foram realizadas análises em termos de tensões – deformações, recorrendo ao programa PLAXIS, para aferição das deformações mobilizadas, em particular a quando da actuação da acção sísmica. Foram analisadas, em termos de estabilidade do contraforte parcialmente escavado, as seguintes situações para as zonas A (aluvião com espessura máxima de 4m) e B (aluvião com espessura máxima de 6m), tendo por base o estipulado na regulamentação em vigor, em particular EC7 e EC8:

- 1) Sem qualquer escavação do contraforte (CF) – situação estática;
- 2) Sem qualquer escavação do contraforte (CF) – situação dinâmica de curto prazo;
- 3) Com a escavação parcial do contraforte e sem intervenção de estabilização (CF) – situação dinâmica de curto prazo;
- 4) Com a escavação parcial do contraforte e com a intervenção de estabilização proposta (CF) – situação dinâmica de curto prazo.

A acção sísmica foi quantificada de acordo com a regulamentação em vigor, em função do zonamento sísmico. Na Figura 8 são apresentados os factores de segurança obtidos nas análises de estabilidade realizadas, assim como as deformações associadas à acção sísmica.

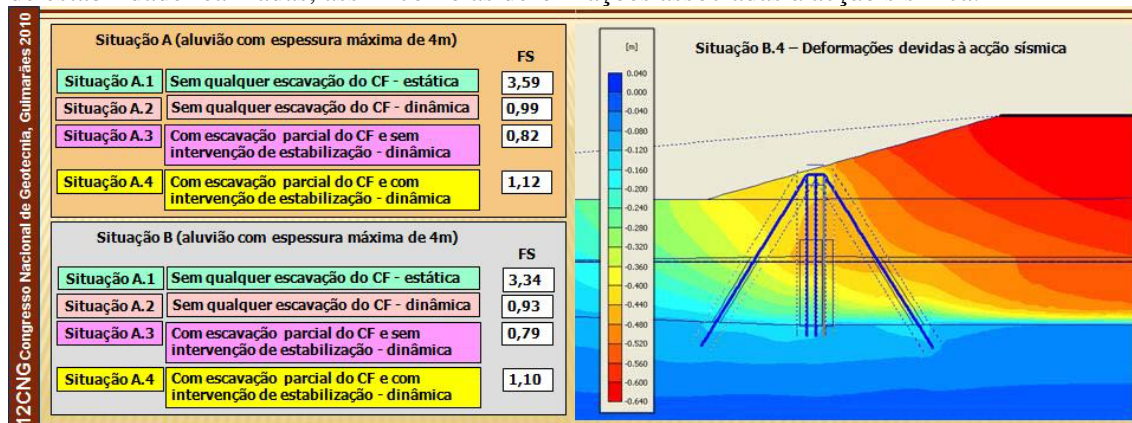


Figura 8 - Verificação da Segurança do Contraforte: Quadro Resumo de Equilíbrio Limite e Tensões – Deformações para a Situação B.4

Da análise destas situações foi possível concluir que para a geometria final do contraforte, não são respeitadas as condições de segurança regulamentares, no que se refere à acção sísmica prevista no DNA do EC8. Neste enquadramento, foi proposta a construção de estruturas de estabilização que compensassem a escavação parcial do mesmo contraforte.

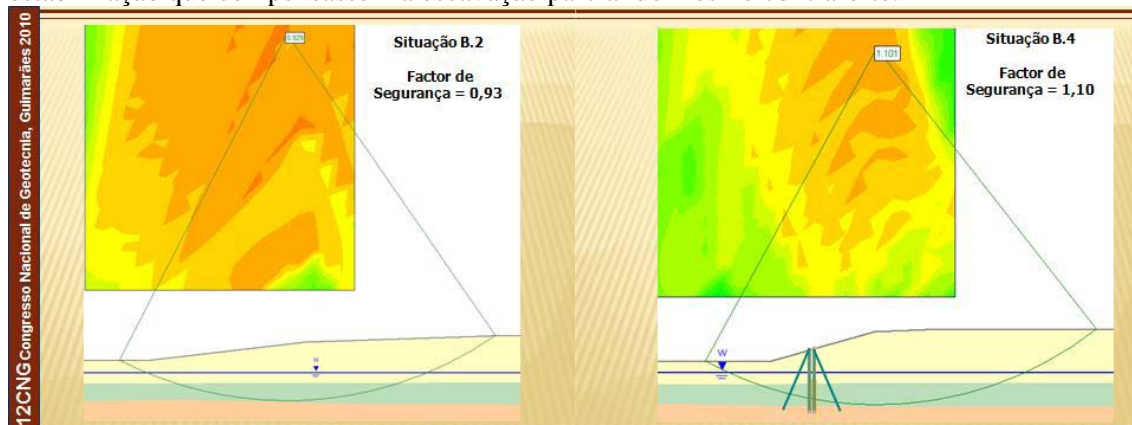


Figura 9 - Verificação da Segurança do Contraforte em Termos de Equilíbrio Limite

Tendo por base o cenário geológico do local, a topografia do terreno, assim como a necessidade de recorrer a tecnologias construtivas compatíveis com a heterogeneidade dos aterros, bem como ainda a proximidade do Aterro Sanitário de Beirolas, propôs-se a realização de uma solução de estabilização por colunas de jet grouting, encabeçadas por uma viga em betão armado.

De forma a melhor controlar as deformações, as colunas serão executadas verticais e sub verticais, armadas com perfis metálicos, do tipo HEB (verticais) e de secção tubular (sub verticais), com entrega ao nível do substrato miocénico. Como já referido, estes elementos são encabeçados por uma viga de coroamento em betão armado que garantirá o funcionamento solidário dos referidos corpos de solo-cimento. O facto dos elementos metálicos se localizarem no interior destes corpos, permite incrementar o respectivo confinamento ao nível dos materiais aluvionares, assim como a sua protecção à agressividade do terreno envolvente.

4. EXECUÇÃO DOS TRABALHOS DE FUNDAÇÕES INDIRECTAS

4.1 Estruturas Enterradas

O avanço dos trabalhos de furação foi limitado pela presença dos escombros diversos resultantes da demolição das estruturas da antiga Central de Compostagem, existente no local previamente à realização da Expo98, até 1996. Destas restaram intactas no local estruturas enterradas, constituídas por lajes de ensoleiramento e muros, em betão armado. A dificuldade, por parte do equipamento de execução de CSM em atravessar estes elementos caracterizados por dimensões e por taxas de armadura consideráveis, levou à necessidade de um saneamento intensivo da camada de aterros, tendo esta sido realizada através de uma escavação geral na zona de implantação dos Blocos B2 e B3. Esta escavação, com altura de cerca de 3.0m, revelou a presença dos produtos resultantes da demolição dos edifícios existentes no local até 1996, incluindo cubas de compostagem, inteiramente preenchidas com entulho urbano. Foram inclusivamente removidos elementos como pneus e uma grua metálica (Figuras 1, 10 e 11.)



Figura 10 - Escavação e Demolição das Estruturas Enterradas e Vista da Central de Compostagem (1996)



Figura 11 - Evidências de Entulho Diversificado no Interior das Estruturas Enterradas.

4.2 Limitações dos equipamentos

No Bloco B6, correspondente ao futuro pavilhão desportivo, a profundidade à qual foi detectado o substrato Miocénico chegou a atingir os 28m. Esta profundidade não era compatível com o encastramento necessário dos painéis de CSM no mesmo substrato Miocénico, uma vez que o equipamento disponível em obra não permitia a realização de painéis com comprimentos superiores a 25m. Por este motivo, foi concebida uma solução de recalçamento dos painéis CSM, que permitisse uma fundação com segurança ao nível do substrato Miocénico.



Figura 12 - Execução das Microestacas Cravadas e das Colunas de Jet Grouting

A solução de recalçamento concebida consistiu na cravação de microestacas do tipo TRM $\varnothing 170 \times 9 \text{mm}$, em ferro fundido dúctil, no interior dos painéis de CSM logo após a conclusão dos mesmos e antes do início do processo de presa do cimento. Os painéis de CSM funcionam, neste caso, como elemento de confinamento e protecção das microestacas em termos de fenómenos de corrosão e de encurvadura. Os troços de microestaca em contacto directo com o terreno foram armados com varões de diâmetro de 25mm, os quais permitem a compensação da eventual perda de secção face a fenómenos de corrosão, assim como verificação da respectiva verticalidade e reforço das zonas de junta entre os vários troços dos tubos que materializam as microestacas (Figura 12).

Outra situação, onde as dimensões e o peso do equipamento se revelaram como aspectos condicionantes, ocorreu nas fundações do bloco B2, onde o Dono de Obra resolveu aproveitar a pré-escavação geral para a construção de um piso enterrado. A proximidade da cota do fundo da escavação ao horizonte dos materiais aluvionares, assim como as condições atmosféricas desfavoráveis, e ainda o facto de os edifícios adjacentes já se encontrarem em execução (condicionando a realização dos acessos ao fundo da escavação) determinaram a necessidade de substituir a solução de painéis de CSM armados por colunas de jet grouting, igualmente armadas, executadas através de equipamento mais versátil, pelas suas menores dimensões e, sobretudo, menor peso (Figura 12).

5. PRINCIPAIS QUANTIDADES

As principais quantidades, associadas aos trabalhos descritos no presente artigo, encontram-se resumidas na Figura 13.

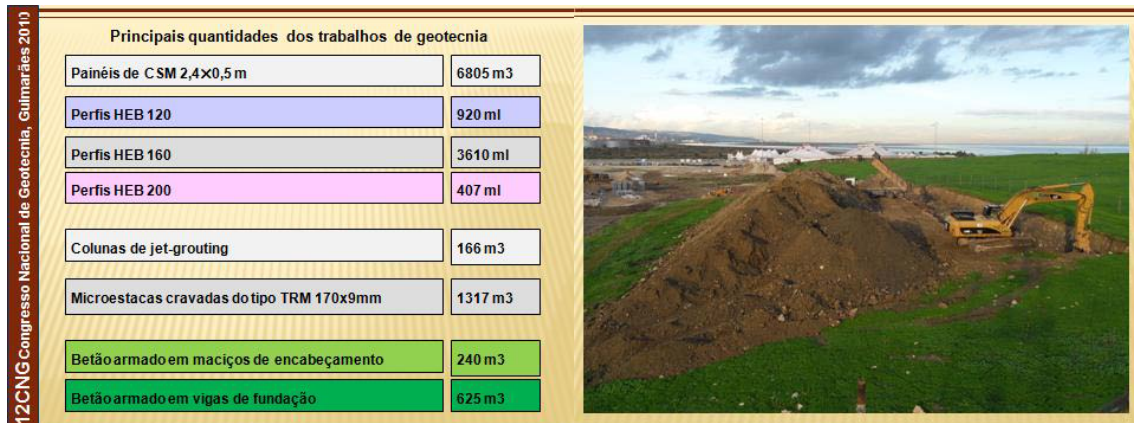


Figura 13 - Principais Quantidades e Vista do Contraforte Anexo ao Aterro Sanitário Parcialmente Escavado

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A solução de fundações indirectas adoptada com recurso a tecnologia de painéis de CSM armados com perfis metálicos, apesar de pioneira a nível nacional, revelou ser uma solução, em geral, adequada face ao complexo cenário geológico e geotécnico da presente obra. Esta constatação é fundamentada no facto do rendimento máximo do equipamento de CSM ter estado próximo dos 85 metros lineares por dia, situação muito difícil de conseguir no mesmo tipo de cenário e com custos equivalentes, através de soluções clássicas de fundações indirectas. Destaca-se ainda o facto da solução de CSM, ao contrário da maioria das soluções clássicas, permitir, pela sua versatilidade em termos de capacidade de furação, o atravessamento, em manobra única, de vários tipos de materiais, desde aterros heterogéneos, passando por materiais aluvionares muito moles, até ao substrato Miocénico, com vantagens económicas e de prazo. Nas situações em que a adopção da solução se revelou mais condicionada, por razões de dimensões, peso, capacidade e produtividade dos equipamentos, destaca-se a facilidade da sua compatibilização com outras soluções de solo - cimento, como o jet grouting, ou de complementaridade, como o recalçamento através de microestacas cravadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Dono de Obra, “Alves Ribeiro S.A.”, a permissão para a publicação da presente comunicação. Consideram ainda importante sublinhar que as soluções implementadas resultaram de um trabalho de equipa, no âmbito do qual deve ser destacado o papel importante na verificação e na validação das soluções propostas, por parte da empresa responsável pelo Projecto de Estabilidade “CONEC – Consultores de Engenharia Civil, Lda.”. Os autores referenciam ainda o facto de que para o sucesso das soluções adoptadas ter contribuído, com os trabalhos de campo de geotecnia e fundações especiais, a empresa “Geo-Rumo – Tecnologia de Fundações S.A.”.

REFERÊNCIAS

- Ameratunga J.; Brown D.; Ramachadran R.; Denny R. (2009) *Ground improvement for a large above ground storage tank using cutter soil mixing columns*. Proceedings of the 17th ICSMGE, pp. 2280-2283.
- Simon, B. (2009) *Projet national de recherche et développement. Amélioration des sols par inclusions verticales rigides*. Travaux n°862, pp. 65-72.
- Wheeler, P. (2009) *Soil-Mix Piles. Mix Factor*. European Foundations. 2009, pp. 10-11.