

A Técnica de Cutter Soil Mixing Aplicada a Escavações Urbanas

Manuel de Matos Fernandes

FEUP, Porto, Portugal, matos.fernandes@fe.up.pt

Artur Peixoto

Geo Rumo – Tecnologia de Fundações S.A., Braga, Portugal, artur.peixoto@georumo.pt

Alexandre Pinto

JetSJ Geotecnia Lda., Lisboa, Portugal, apinto@jetsj.pt

Xavier Pita

JetSJ Geotecnia Lda., Lisboa, Portugal, xpita@jetsj.pt

António Topa Gomes

FEUP, Porto, Portugal, atgomes@fe.up.pt

António Gomes Pedro

FCTUC, Coimbra, Portugal, amgpedro@dec.uc.pt

RESUMO: É apresentada de modo sumário a tecnologia de melhoramento de terrenos designada por Cutter Soil Mixing (CSM) de aplicação recente a nível internacional. São apresentados dois casos de estudo em que esta técnica foi aplicada em estruturas de suporte de escavações urbanas. Apresenta-se uma discussão sobre a perspectiva de aplicação da técnica como sistema de reforço do terreno, previamente à escavação, entre as cortinas de contenção periféricas, em escavações profundas em espessos estratos de solos moles.

PALAVRAS-CHAVE: Cutter Soil Mixing (CSM), escavação, estrutura de contenção, solos moles.

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia designada por Cutter Soil Mixing (CSM), derivada da conhecida por deep soil mixing, tem sido aplicada na Europa nos últimos 5 anos para melhoramento dos solos in situ. A mesma consiste na execução de painéis constituídos por uma mistura mecânica entre um ligante, em geral cimento, e o solo (Borel et al., 2007; Ameratunga et al., 2009; Simon, 2009; Wheeler, 2009). A ferramenta de furação, corte e mistura é análoga à adoptada na tecnologia de execução de paredes diafragma com recurso a hidrofresa, sendo constituída por duas rodas de corte com eixo horizontal, como mostra a Figura 1.

Além da versatilidade do ponto de vista de atravessamento de todos os tipos de solos e de maciços rochosos muito a medianamente alterados, esta técnica destaca-se ainda pela

possibilidade de incorporar integralmente o terreno existente no local da intervenção, independentemente das suas características, na solução de engenharia adoptada para o tratamento do mesmo terreno, com amplas vantagens ambientais.

A tecnologia pode ainda ser utilizada na descontaminação de solos, através da selecção adequada dos agentes químicos a incorporar na mistura de solo-ligante.

Atendendo ainda ao funcionamento mecânico do equipamento de furação e mistura, a técnica de CSM permite a realização dos painéis com o mínimo de perturbação do solo, o que a torna especialmente vocacionada para intervenções em meio urbano, incluindo as de contenção de terrenos.



Figura 1. Vista do equipamento de execução e de um painel de solo-ligante através da tecnologia de CSM

2 PARQUE DE ESTACIONAMENTO SUBTERRÂNEO EM LAGOS

2.1 Aspectos gerais. Geologia e Geotecnia

O primeiro caso de estudo que se apresenta diz respeito à estrutura provisória de suporte da escavação para um parque de estacionamento automóvel em Lagos, Algarve, Portugal. O parque desenvolve-se em 2 pisos, tendo a escavação profundidade de 6,0 m, área em planta de 6335 m² e perímetro de 531 m (Figura 2a).

A obra situa-se na frente ribeirinha da cidade, numa área conquistada ao mar por meio de aterros, adjacente à muralha da Fortaleza de Lagos e na proximidade um edifício público (tribunal).

A solução adoptada consistiu numa contenção periférica provisória constituída por uma cortina contínua de painéis de CSM reforçados com perfis de aço verticais e um nível de ancoragens pré-esforçadas.

No essencial, o terreno no local é constituído por duas camadas: i) desde a superfície até uma profundidade de cerca de 6 m, ocorrem aterros arenosos (N_{SPT} entre 6 e 60, com valor médio de 13, ZG2); sob os aterros ocorrem calcarenitos do período Miocénico (N_{SPT} entre 7 e 60, com valor médio de 40, ZG1). O nível freático encontra-se perto da superfície e varia com as marés.

2.2 Solução Adoptada

A cortina de contenção provisória, constituída por 262 painéis de CSM, foi realizada sequencialmente por painéis primários e secundários com secção 2,40x0,60 m² e uma sobreposição entre si de 0,20 m. Cada um dos painéis foi executado até uma profundidade máxima de 12,0 m e reforçado com três perfis verticais de aço tipo IPE 330. A solidarização dos perfis metálicos foi garantida por meio de uma viga de coroamento com secção de 0,60x0,90 m², à qual foram amarradas as ancoragens provisórias, inclinadas com a horizontal de 35°, afastadas longitudinalmente de 2,50 m e pré-esforçadas a 600 kN.

Após a conclusão da escavação, construiu-se a estrutura definitiva interna de betão armado, constituída por uma laje de fundo estanque, pregada ao maciço de fundação para equilibrar as sub-pressões da água, pilares, lajes e uma parede periférica betonada contra a parede de CSM (Figura 2b).

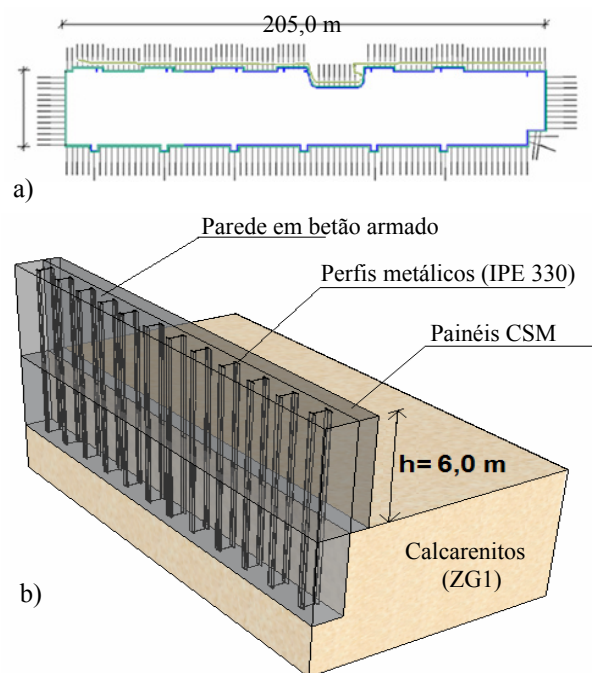


Figura 2. Caso de Estudo 1: a) planta da escavação; b) aspecto 3D da solução estrutural.

No âmbito do controlo da qualidade do solo tratado realizaram-se ensaios de compressão uniaxial e de compressão diametral sobre 36 provetes recolhidos dos painéis de CSM. Os valores médios dos resultados dos ensaios encontram-se resumidos na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados dos ensaios do material tratado

$\sigma_{\text{compressão, med}}$ (MPa)	$\sigma_{\text{tração, med}}$ (MPa)	E (GPa)
3,1	0,3	2,9

2.3 Observação da obra e desempenho

O plano de observação estabelecido incluiu a instalação de: i) 5 inclinómetros no terreno junto ao tardo da cortina; ii) 5 células de carga nas cabeças das ancoragens; iii) 17 alvos topográficos na viga de coroamento e, paralelamente, no alinhamento da muralha.

A aplicação da técnica de CSM na obra apresentada permitiu obter resultados muito satisfatórios em termos de estabilidade e de deformações da estrutura de contenção, sendo de salientar o seu bom funcionamento como elemento de impermeabilização.

Na Figura 3 pode observar-se o aspecto dos painéis de solo tratado com CSM. A Figura 4 mostra uma vista geral da obra no fim da escavação.



Figura 4. Vista da parede de CSM



Figura 3. Vista geral da obra depois de concluída a escavação

3 ESCAVAÇÃO PARA ESTAÇÃO ELEVATÓRIA EM LISBOA

3.1 - Aspectos gerais. Geologia e Geotecnia

O segundo caso de estudo corresponde à escavação para a construção de uma estação elevatória (EE) para o sistema de saneamento dos edifícios-sede da Agência Europeia de Segurança Marítima e do Observatório Europeu da Droga, em Lisboa, entre o Cais do Sodré e o Terreiro do Paço, junto à margem direita do rio Tejo, numa zona conquistada ao rio, como mostra a Figura 5. A escavação tem uma profundidade de 12,0 m, área em planta de 440 m² e perímetro de 135 m.



Figura 5. Localização da obra

O local da intervenção caracteriza-se por aterros heterogêneos à superfície, com espessura média de 7,5 a 9,0 m (ZG3), incluindo, por vezes, restos de entulho e

materiais pedregosos. Sob os aterros localizam-se as formações aluvionares, de composição essencialmente argilo-lodosa e areno-lodosa, com resistência equivalente a, respectivamente, N_{SPT} de 0 a 4 e N_{SPT} de 4 a 10 (ZG2A – N_{SPT} inferior a 2, ZG2B – N_{SPT} entre 4 e 10 e ZG2C – N_{SPT} entre 15 a 20). As formações aluvionares assentam, por sua vez, sobre terrenos miocénicos, com características de substrato (ZG1), constituídos por argilas e areolas.

Associado a estas condições encontra-se a posição elevada do nível freático, coincidente com o nível da água no rio Tejo, variável com as marés.

3.2 Solução adoptada para a contenção da EE

De acordo com os condicionalismos descritos, foi adoptada para contenção periférica uma solução materializada por uma parede de 0,60 m de espessura, constituída por painéis de CSM. A parede de contenção assumiu assim três funções simultâneas (Figura 6):

- elemento de contenção: de forma a permitir a realização da escavação na vertical, preservando a estabilidade do maciço escavado e das infra-estruturas vizinhas;
- elemento de fundação e de pregagem da estrutura da EE, face às sub-pressões;
- elemento de limitação da afluência de água ao interior da escavação nas fases de construção e de exploração.

A parede de contenção periférica foi constituída por painéis de solo tratado, executados através da tecnologia CSM, com

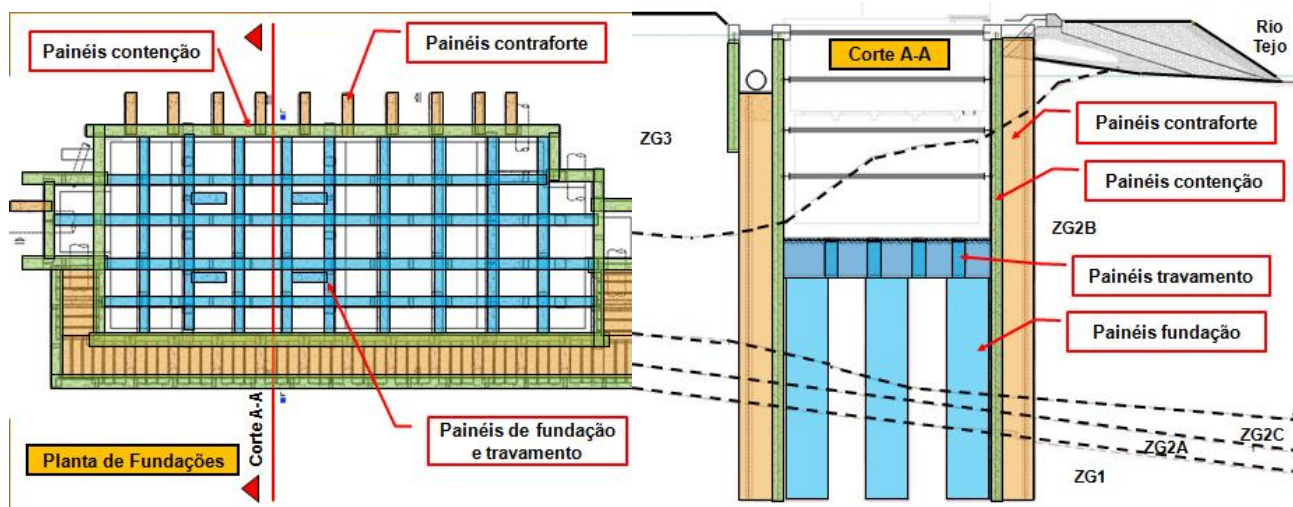


Figura 6. Planta e corte da estrutura de suporte da escavação da Estação Elevatória

dimensão de $2,40 \times 0,60 \text{ m}^2$, dispostos no perímetro da escavação, com sobreposição mínima de 0,20 m e prolongados até ao substrato, de forma a limitar a afluência de água através do fundo da escavação. Tal exigiu a realização de painéis com altura até 27 m. Estes painéis foram armados verticalmente com perfis de aço tipo IPE 300, posicionados no interior dos mesmos antes do início de presa do cimento.

Tendo em conta a grande profundidade do substrato e a baixa resistência do solo sobrejacente, a cortina periférica foi complementada com uma grelha de painéis de travamento interior, executados previamente à escavação e imediatamente abaixo da cota da base desta, executados também pela técnica de CSM. Os elementos de travamento tinham 2,0 m de altura e estavam dispostos com intervalos (entre eixos) de 2,75 m e de 2,25 m, consoante a direcção, como mostra a Figura 6. Alguns destes elementos foram prolongados até ao substrato para fundação da estrutura definitiva.

De modo a preservar o comportamento da estrutura interna da EE perante a acção sísmica, a rigidez da parede periférica foi incrementada através de contrafortes, colocados perpendicularmente à parede de contenção, do lado exterior, tendo-se para tal recorrido a painéis CSM com $2,4 \times 0,6 \text{ m}^2$, igualmente armados com perfis de aço.

A parede periférica, formada pelos painéis e pelos perfis verticais, foi encabeçada por uma viga de betão armado, com altura de 0,80 m e largura variável entre os 0,95 m e 1,20 m, a qual foi ligada à parede definitiva interior, em betão armado, solidarizando o conjunto, e permitindo que a mesma parede periférica funcionasse também como fundação da EE.

Desta forma, os painéis de CSM desempenharam 4 funções, conforme mostra a Figura 6: contenção periférica em fase provisória, travamento interior em fase provisória, fundação-ancoragem na direcção vertical em fase definitiva e, finalmente, reforço sísmico em fase definitiva. No que se refere ao travamento provisório acima da base da escavação, este foi garantido por escoramento convencional com perfis de aço, instalados por níveis acompanhando o progresso da escavação,

composto por vigas de distribuição HEB300 e escoras HEB200 e HEB260, como mostra a Figura 7.

É de mencionar, por fim, que a solução adoptada para a estrutura de contenção provisória se mostrou integralmente compatível com a da estrutura definitiva, permitindo mesmo a optimização do dimensionamento dos elementos estruturais interiores, betonados directamente contra os painéis de CSM, como mostra a Figura 8.

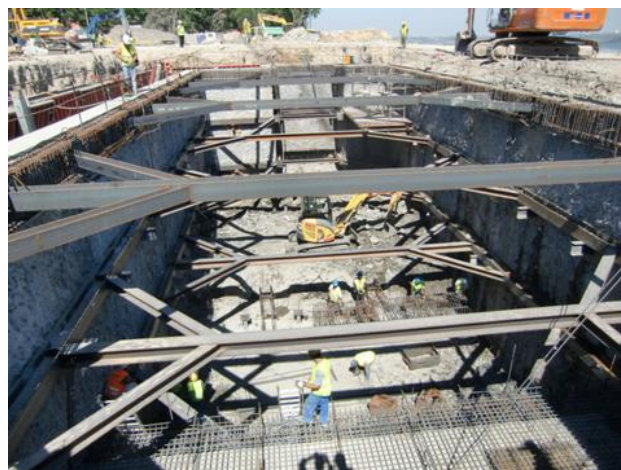


Figura 7. Vista da obra na fase final da escavação



Figura 8. Pormenores dos painéis de CSM e compatibilização com a estrutura interior

4 PERSPECTIVAS DE USO DO CSM EM ESCAVAÇÕES PROFUNDAS EM SOLOS MOLES

4.1 Soluções de reforço-tratamento prévias à escavação

Para o controlo dos movimentos e dos esforços estruturais nas escavações profundas em estratos de argilas moles de grande espessura são conhecidas algumas medidas de reforço-tratamento do terreno entre as cortinas periféricas previamente à escavação. A Figura 9 ilustra as duas mais conhecidas: i) painéis transversais de paredes diafragma abaixo da base da escavação; ii) “laje” de solo tratado por jet grouting abaixo ou acima (caso da figura) da base da escavação.

Estas soluções, embora bastante mais eficazes do que as convencionais, têm significativas limitações. A primeira solução, cuja aplicação se tem limitado aos países escandinavos, apresenta dificuldades relacionadas com a incompleta remoção do solo mole nas ligações entre as paredes transversais e longitudinais e entre painéis (Karlsrud & Andresen, 2007). Acresce que os reforços têm que se limitar a ficar abaixo da base da escavação, tendo em conta a dificuldade que implicaria a sua demolição. No que respeita ao jet grouting, dificuldades na chamada “purga” podem implicar aumentos de volume do terreno, induzindo deslocamentos da parede para o exterior da ordem de grandeza ou superiores àqueles que se pretende acautelar (Wong & Poh, 2000).

Crítica comum às duas soluções é que elas implicam a realização, a partir da superfície, de operações em profundidade, em condições de controlo de execução muito difíceis, de elementos de importância crucial para o desempenho da estrutura de suporte.

Deve notar-se que a solução apresentada na secção 3 deste trabalho para a Estação Elevatória pode considerar-se análoga à da Figura 9a, embora executada por técnica distinta, mas com a vantagem de ultrapassar as dificuldades nas juntas verticais entre painéis.

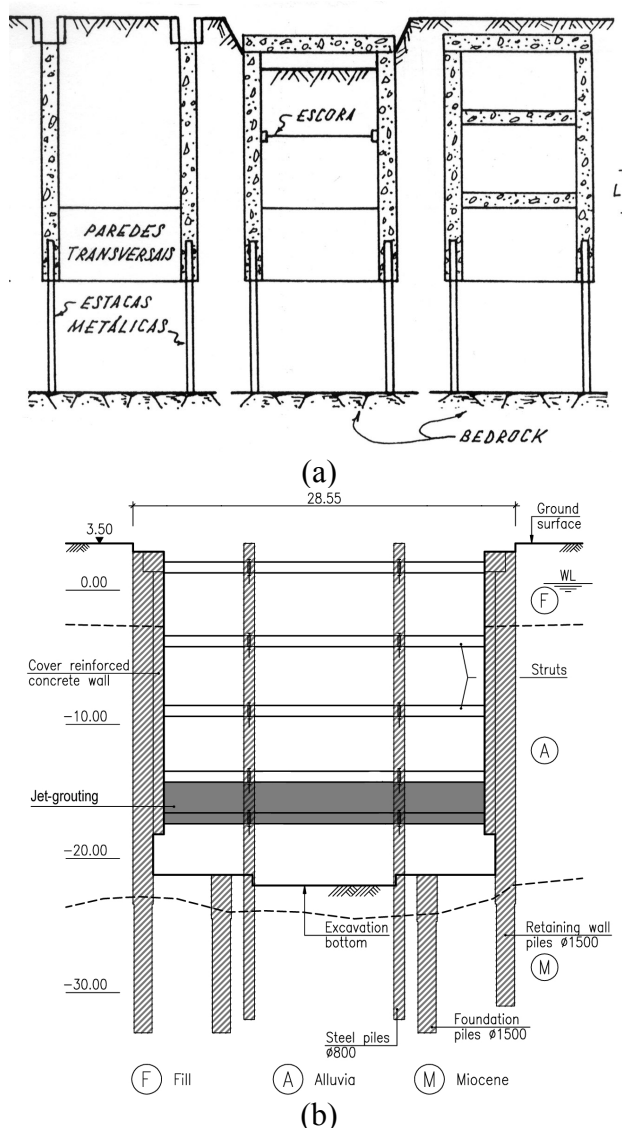


Figura 9. Soluções de tratamento-reforço de estruturas de suporte de escavações profundas em solos moles: a) painéis transversais de parede diafragma (Eide et al., 1972); b) laje de jet grout (Matos Fernandes et al., 2007)

Para escavações muito profundas, e como mostra a Figura 10, uma solução de reforço conveniente, em alternativa às anteriores, poderia consistir na execução do travamento transversal das paredes periféricas, do topo à base, com um dado intervalo na direcção longitudinal, por meio de painéis tipo CSM.

A experiência disponível permite afirmar que esta técnica preenche os seguintes requisitos, muito relevantes neste contexto: i) impacto negligenciável associado à execução; ii) material resultante do tratamento do solo fácil de demolir mas, em simultâneo, com baixa deformabilidade (similar à do jet grout); iii) rigor de implantação; iv) boas ligações entre painéis.

Como mostra a Figura 10, seria conveniente instalar as zonas tratadas coincidindo com as juntas dos painéis que formam a parede diafragma periférica, logo com espaçamento longitudinal de 5-6 m, e prolongadas até ao substrato.

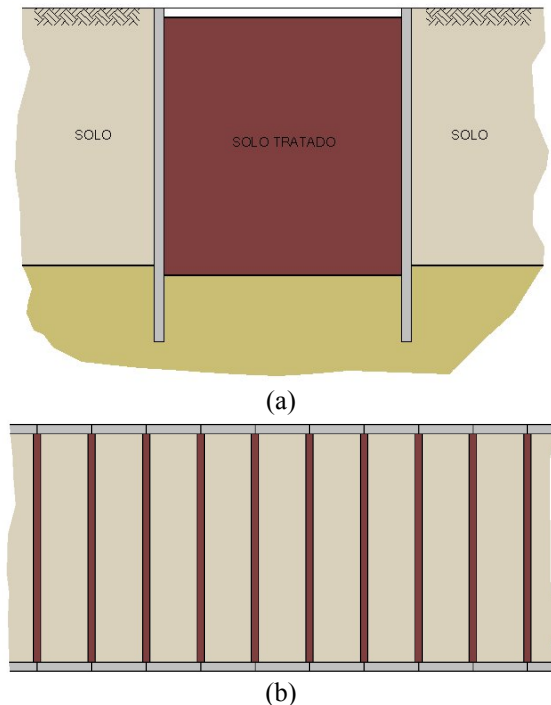


Figura 10. Travamento transversal até ao topo das paredes periféricas com painéis CSM: a) corte transversal à escavação; b) planta

4.2 Avaliação preliminar do travamento com CSM

De modo a obter uma avaliação preliminar comparativa do sistema descrito com CSM em relação a uma solução de tratamento com jet grout, selecionou-se as condições da escavação para a Estação Terreiro do Paço do Metropolitano de Lisboa, cuja secção transversal se representa na Figura 9b.

A Tabela 2 resume as condições admitidas nas análises de elementos finitos efectuadas. A análise JET corresponde *grosso modo* à solução construída (Mateus de Brito e Matos Fernandes, 2006). A análise CSM corresponde à solução com travamento com painéis CSM mostrada na Figura 10, admitindo painéis com espessura de 0,8 m e espaçamento longitudinal de 6,0 m. As análises foram realizadas com o programa PLAXIS 3D, tirando partido das condições de simetria.

Admitiu-se uma parede diafragma com 1,2 m de espessura, de rigidez equivalente à da cortina de estacas da estrutura real. Os 5 níveis de escoras foram admitidos com afastamento longitudinal igual a 3,0 m, o que significa que cada painel da parede diafragma periférica fica apoiado por um par de escoras de cada nível. De qualquer modo, a rigidez e o pré-esforço do escoramento (por metro linear) são equivalentes à estrutura real.

Tabela 2 – Análises de elementos finitos

Análise	Condições de apoio da cortina
JET	5 níveis de escoras pré-esforçadas + laje de jet-grout com 3 m de espessura, entre os 17.5 m e os 20.5 m de profundidade (1) (2) (4)
CSM	5 níveis de escoras pré-esforçadas + painéis transversais de CSM com 0.8 m de espessura, espaçados de 6 m, entre a superfície e 30 m de profundidade (1) (3) (4)

Notas:

- 1- ESCORAS - Secção transversal: 1º nível: 233 cm²; 2º nível: 306 cm²; 3º nível: 335 cm²; 4º nível: 479 cm²; 5º nível: 306 cm²; Rigidez efectiva = 0.8 x rigidez teórica; Pré-esforço: 1º nível = 900 kN; 2º–5º níveis = 3000 kN;
- 2- $E_{\text{jet-grout}} = 0,8 \text{ GPa}$; admitido elástico linear;
- 3- $E_{\text{CSM}} = 0.8 \text{ GPa}$; admitido elástico linear;
- 4- Argila mole: $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$;
 $c_u(\text{kPa}) = 20 + 0.22 \sigma'_{v0}$; $E_u = 400 c_u$;
 Substrato miocénico: $\gamma = 21.5 \text{ kN/m}^3$;
 $c_u = 400 \text{ kPa}$; $E_u = 400 c_u$

A Figura 11 ilustra os deslocamentos laterais da cortina no fim da escavação e as envolventes de momentos flectores, na secção a meia distância entre painéis transversais, para as análises realizadas.

É interessante observar que, apesar da grande diferença em termos estruturais fornecida pelos dois tipos de tratamento – uma “laje” horizontal na análise JET e um “contraforte” vertical na análise CSM – os deslocamentos são praticamente coincidentes. A sua grandeza é extremamente pequena, inferior a 0,1% da profundidade da escavação.

Tendo em consideração as vantagens oferecidas pelo CSM no que respeita ao controlo de execução, acima enumeradas, a

solução imaginada afigura-se como merecedora de consideração em casos particularmente difíceis e em que o apertado controlo dos movimentos seja imperioso.

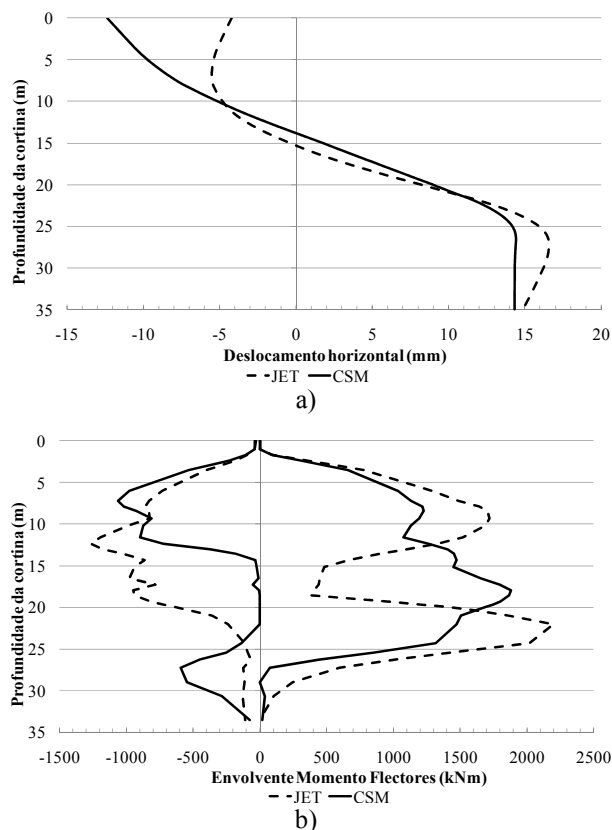


Figura 11. Comparação entre os resultados das análises da Tabela 2: a) deslocamentos da parede no fim da escavação; b) envolventes dos momentos flectores na parede

Importa ainda mencionar que a solução em causa traz as seguintes vantagens muito relevantes: i) os painéis de CSM podem servir de apoio da laje de fundo e da estrutura interna em fase definitiva; ii) o tratamento por CSM pode obturar fendas resultantes de eventuais defeitos de execução nas juntas da parede periférica; iii) os painéis de CSM podem ser usados, antes da presa, para instalar os perfis verticais do sistema de contraventamento do escoramento; iv) pode obter-se uma redução sensível dos momentos flectores em relação à solução com laje de jet grout.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho apresenta a técnica de Cutter Soil Mixing que, quando aplicada a escavações urbanas, permite a materialização de paredes periféricas e de travamentos interiores destas

através de painéis de solo-ligante. Os casos apresentados sugerem que a técnica apresenta grande potencial, em particular na materialização de travamentos interiores em condições de execução favoráveis em relação a soluções já conhecidas.

Para finalizar, deve salientar-se a importância do controlo de qualidade do material tratado por meio da recolha de amostras de solo-ligante, quer em fresco, quer por meio de carotagens, para realização de ensaios laboratoriais, em geral de compressão uniaxial com medição do módulo de deformabilidade. No que se refere ao controlo de execução, destaca-se o apetrechamento tecnológico dos equipamentos que executam os painéis de solo-ligante, os quais permitem, em tempo real, o registo e a correcção de todos os parâmetros de execução.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos Donos das Obras descritas, a autorização para a redacção e publicação do presente trabalho.

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.
- Borel, S. e Hamelin, P. J. (2007). Geomix, an innovative technique. The pilot projects of le Havre and Miami. *Travaux n°843*, pp. 54-58.
- Brito, J. M. & Matos Fernandes, M. (2006) Terreiro do Paço Station of Metropolitano de Lisboa: conception, design predictions and performance (in Portuguese). *Actas do 3º CL-BG*, Curitiba, pp. 21-42.
- Eide, O.; Aas, G. & Josang, T. (1972) Special application of cast-in-place walls for tunnels in soft clay in Oslo. *Proc. Vth ECSMFE*, Madrid, v. 1, pp. 485-498.
- Karlsrud, K. & Andresen, L. (2007) Design of deep excavations in soft clays. *Proc. XIVth ECSMGE*, Madrid, v. 1, pp. 75-99.
- Matos Fernandes, M.; Maranha das Neves, E.; Salgado, F.; Caldeira, L.; Pina, R.; Flor, A.; Brito, J. M. & Tavares, A. (2007) Jet grouting solutions for cut-and-cover subway metro stations in Lisbon downtown. *Proc. XIVth ECSMGE*, Madrid, v. 2, pp. 895-900.
- Simon, B. (2009). Projet national de recherche et developpement. Amelioration des sols par inclusions verticales rigides. *Travaux n°862*, pp. 65-72.
- Wheeler, P. (2009). Soil-Mix Piles. Mix Factor. *European Foundations. Autumn 2009*, pp. 10-11.