

A TÉCNICA DE CUTTER SOIL MIXING E A SUA APLICAÇÃO A UMA ESCAVAÇÃO URBANA

CUTTER SOIL MIXING AND ITS APPLICATION TO AN URBAN EXCAVATION

Sousa, Estela, *Geo-Rumo, Tecnologia de Fundações, S.A., Braga, Portugal, estela.sousa@georumo.pt*

Matos Fernandes, Manuel, *FEUP, Porto, Portugal, mfern@fe.up.pt*

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

Baptista, Marco António, *A400, Projectistas e Consultores de Engenharia, Lda., Portugal, marco.baptista@a400.pt*

RESUMO

A recente técnica de melhoramento de solos designada por *Cutter Soil Mixing* permite a execução de painéis de solo tratado de forma paralelepípedica, semelhantes aos das paredes moldadas, através da desagregação e mistura do solo com calda de cimento. O equipamento consiste numa hidrofresa (*Cutter*) com dois conjuntos de rodas dentadas que giram em torno de um eixo horizontal, permitindo o conhecimento da geometria exacta do material tratado em profundidade, a ligação eficaz entre painéis e o controlo em tempo real da qualidade da mistura. Neste trabalho apresenta-se a primeira aplicação desta técnica em Portugal para a construção da cortina provisória de suporte da escavação para um parque de estacionamento na frente ribeirinha da cidade de Lagos. Apresentam-se alguns aspectos de maior interesse relacionados com o processo de execução da cortina e os resultados obtidos através da observação da obra, no âmbito do controlo da qualidade.

ABSTRACT

The recent technique of soil improvement designated by *Cutter Soil Mixing* allows the execution of panels of treated soil in depth through the disaggregation and mixture of the soil with cement slurry. The equipment consists of a hydrofraise (*Cutter*) with two groups of bitten wheels that rotate around a horizontal axis, allowing the knowledge of the exact geometry of treated soil in depth, the effective connection among panels and the control in real time of the mixture quality. This work presents the application of *Cutter Soil Mixing* to the construction of a temporary wall to support an excavation for the construction of an underground parking lot at the riverside of Lagos. Some technical details regarding the execution process of the wall and the observation of the work, in the extent of quality control, are reported.

1. INTRODUÇÃO

No panorama da Geotecnia em geral e, particularmente, no âmbito das técnicas de melhoramento de solos, as exigências passam cada vez mais por encontrar soluções que, sendo técnica e economicamente viáveis, causem o menor impacto ambiental possível. A utilização dos solos como material de construção através da sua mistura *in situ* com agentes estabilizadores tem vindo a ser alvo de intensificação e de diversificação ao longo do tempo, tendo-se desenvolvido técnicas inovadoras e versáteis na tentativa de encontrar soluções cada

vez mais sustentáveis. Neste contexto, apresenta-se a técnica de *Cutter Soil Mixing* (CSM) que tem por base a utilização do próprio solo como material de construção através da sua desagregação e mistura com calda de cimento, com recurso a uma hidrofresa, formando painéis de solo tratado com geometria perfeitamente conhecida em profundidade.

Este trabalho incide na aplicação daquela técnica a escavações urbanas, apresentando-se um caso de obra que consiste na estrutura de contenção provisória para as escavações do parque de estacionamento subterrâneo FUTURLAGOS, inserido no plano estratégico de reformulação do sistema viário da Avenida dos Descobrimentos na cidade de Lagos. A estrutura de contenção é constituída por painéis de CSM reforçados com perfis metálicos verticais e associados no topo a um nível de ancoragens. Esta solução foi apresentada em alternativa à solução inicialmente preconizada, constituída por uma cortina de estacas com diâmetro de 800 mm, implantadas com um afastamento de aproximadamente 1 m e impermeabilizada recorrendo a colunas de *jet-grout* localizadas no seu tardoz.

2. O PRINCÍPIO DA TÉCNICA DE CSM

2.1. Aspectos Gerais da Técnica de CSM

O princípio de aplicação da técnica de CSM consiste na desagregação do solo por acção mecânica de rodas de corte, cujo movimento de rotação se processa em torno de um eixo horizontal, propiciando a mistura de calda de cimento que é injectada simultaneamente. Esta técnica apresenta-se como um desenvolvimento das técnicas de *Deep Soil Mixing* (DSM), utilizando alguns princípios de execução de paredes moldadas, nomeadamente a hidrofresa.

Alguns exemplos de aplicação desta técnica são as cortinas de contenção de escavações, as cortinas de impermeabilização, a estabilização e reforço de terrenos de fundação, a redução do risco de liquefacção de areias e o isolamento de solos contaminados. Projectos recentes bem sucedidos permitem afirmar que esta é uma solução interessante, tanto a nível técnico como económico, tendo já sido implementada com sucesso em diversos países (Gerressen, Schopf & Stotzer, 2009).

Existe um vasto conjunto de vantagens que torna esta técnica competitiva, nomeadamente em relação à técnica de *jet grouting* e a soluções convencionais de contenção, sendo de destacar:

- o aproveitamento do solo como material de construção;
- a desagregação rápida do material a tratar, optimizando o processo de mistura;
- a ligação eficaz entre painéis, mesmo com idades diferentes de construção;
- a facilidade em conhecer a geometria exacta do material tratado em profundidade;
- a quantidade reduzida de refluxo;
- a possibilidade de execução com o nível freático à superfície;
- a aplicação a todos os tipos de solo, com menor eficácia em solos densos, compactos ou com presença de blocos de grandes dimensões.

2.2. Processo de Execução

A aplicação desta técnica segue determinados procedimentos que devem ser adaptados às condições do solo e aos requisitos específicos do projecto.

Uma vez definida em planta a localização dos painéis e as respectivas dimensões, procede-se ao alinhamento do equipamento e a ferramenta de corte é conduzida a uma velocidade constante

para o interior do maciço, desagregando-o por acção das rodas dentadas. Durante esta fase de furação, a calda de cimento vai sendo injectada e é efectuado o controlo do volume adicionado ao painel. A velocidade de descida do equipamento e o volume de calda de cimento devem ser ajustados de forma a otimizar o aproveitamento de energia e criar uma massa de material homogéneo que permita facilmente a descida e a subida do equipamento. Dependendo do tipo de solo, poderá ser necessário o uso de bentonite durante esta fase, para proceder à estabilização das paredes do furo e, nesse caso, a calda de cimento é adicionada apenas durante a subida do equipamento. A segunda fase do processo consiste na extracção do equipamento. Durante esta fase procede-se novamente à injeção de calda de cimento de forma a homogeneizar a mistura. O processo de execução descrito encontra-se esquematizado na Figura 1.

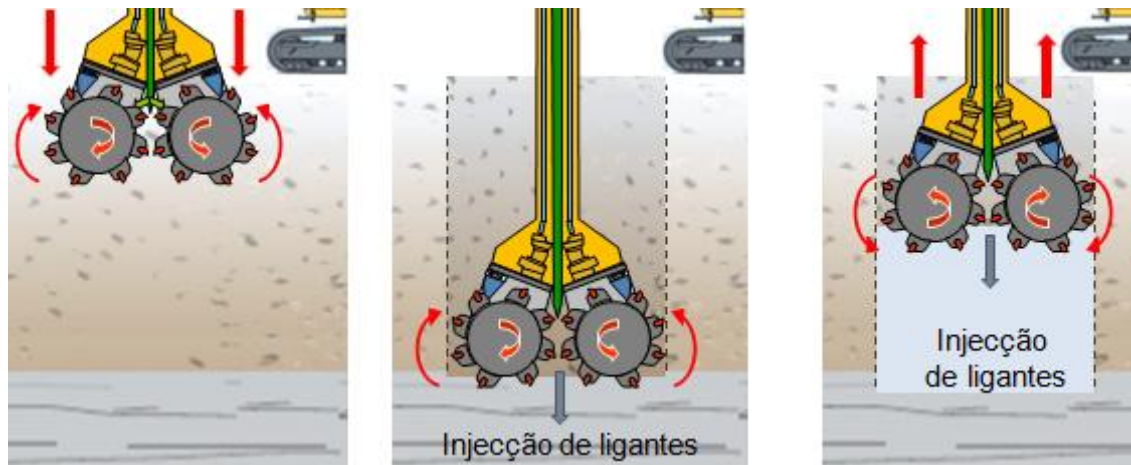


Figura 1 – Processo de Execução dos Painéis de CSM

O objectivo principal deste procedimento é melhorar as características mecânicas do solo, tais como a compressibilidade e a resistência, e reduzir a permeabilidade, sendo as propriedades da mistura obtida reflexo não só do tipo de solo que serve de base ao tratamento, como também do método de mistura utilizado e das características do ligante adicionado. Os painéis de CSM podem ser armados com perfis metálicos verticais, de acordo com a sua finalidade. Nesse caso, os perfis metálicos são inseridos nos painéis de solo tratado por gravidade ou com recurso a martelos e vibradores, logo após a sua execução.

A execução de uma parede contínua constituída por painéis de CSM é efectuada sequencialmente por painéis primários e secundários. Esta sequência de construção permite assegurar que os painéis ficam parcialmente sobrepostos, garantindo-se a solidarização dos mesmos e obtendo-se assim uma parede contínua, como ilustra a Figura 2. A distinção entre painéis primários e secundários está relacionada apenas com a sequência de execução.

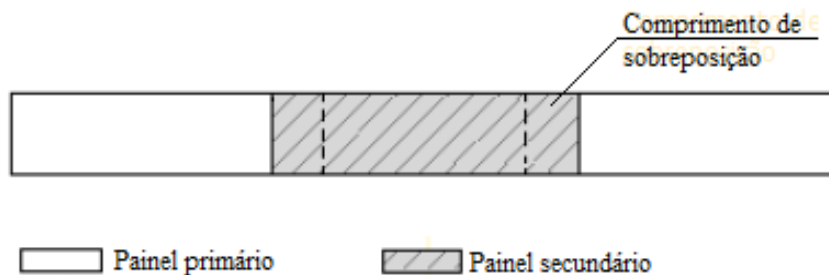


Figura 2 – Sequência de Execução por Painéis Primários e Secundários

2.3. Equipamento

O equipamento consiste numa hidrofresa que pode ser suportada por um sistema de vara *Kelly* para profundidades até 35 m ou por um sistema de cabos de suspensão, caso o tratamento envolva profundidades superiores. Admite-se que com este sistema a profundidade máxima do tratamento é da ordem de 80 m.

As dimensões finais dos painéis de solo tratado dependem apenas das dimensões do próprio equipamento utilizado. Na Figura 3 apresentam-se as características dos modelos de *cutter* actualmente fabricados pela *Bauer Maschinen*.

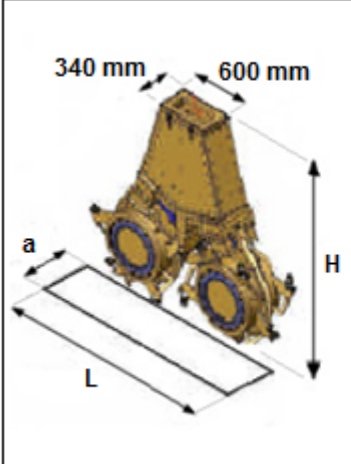
	BCM 5	BCM 10	
	Momento de Rotação=	0 - 57 kN.m	0 - 100 kN.m
	Velocidade de Rotação=	0 - 40 r.p.m.	0 - 35 r.p.m.
	Peso=	5100 kg (rodas 500 mm)	7400 kg (rodas 640 mm)
	Altura (H)=	2,35 m	2,80 m
	Comprimento dos painéis (L)=	2,40 m	2,80 m
Largura dos painéis (a)=	500 - 1000 mm	640 - 1200 mm	

Figura 3 – Características dos Modelos de *Cutter*: BCM 5 e BCM 10 (*Bauer Maschinen*)

Este equipamento incorpora as mais recentes tecnologias de monitorização possibilitando o processamento em tempo real de diversos parâmetros de execução (Lopez, Majewski & Harvey (2005).

A Figura 4 mostra o painel de controlo do equipamento, através do qual os parâmetros de controlo podem ser ajustados pelo manobrador no decorrer da execução dos painéis, de forma a garantir a qualidade da mistura final obtida.

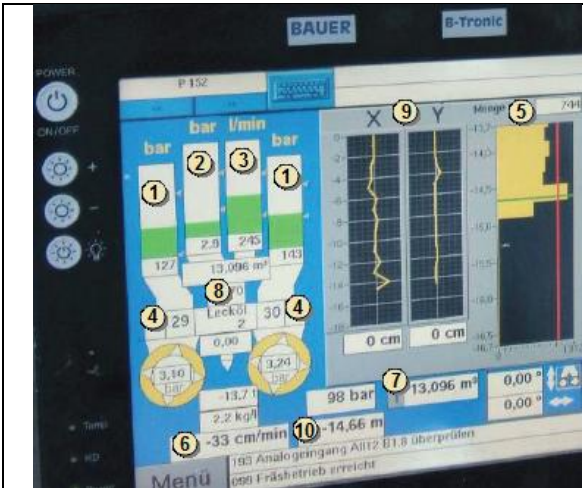
	<p>Dados da máquina:</p> <p>1 – Pressão hidráulica dos motores das rodas;</p> <p>2 – Pressão da bomba de injeção da calda;</p> <p>3 – Débito da bomba de injeção da calda;</p> <p>4 – Velocidade de rotação do <i>cutter</i>.</p>
	<p>Dados de produção:</p> <p>5 – Controlo de volume de calda de cimento injectada em profundidade;</p> <p>6 – Velocidade de avanço do <i>cutter</i>;</p> <p>7 – Volume total de calda de cimento injectada;</p> <p>8 – Pressão exterior do tratamento.</p>
<p>Controlo da verticalidade:</p> <p>9 – Desvios do <i>cutter</i> relativamente à posição inicial, ao longo da profundidade do tratamento;</p> <p>10 – Profundidade do <i>cutter</i>.</p>	

Figura 4 – Painel de Controlo do Equipamento

3. CASO DE ESTUDO

3.1. Aspectos Gerais da Obra

O caso de estudo que se apresenta consiste na estrutura de suporte das escavações para o parque de estacionamento FUTURLAGOS, localizado na frente ribeirinha da cidade de Lagos. A área de escavação é de aproximadamente 6335 m², com um perímetro de 531 m (Figura 5a) e uma profundidade máxima de escavação de 6,0 m abaixo da cota inicial do terreno. A estrutura de suporte das escavações consistiu, em fase provisória, numa contenção periférica constituída por painéis de CSM, reforçada com perfis metálicos verticais e associada no topo a um nível de ancoragens.

A prospeção geotécnica, a execução da estrutura de contenção provisória e do sistema de drenagem bem como todos os trabalhos de escavação necessários, ficaram a cargo da empresa Geo-Rumo, Tecnologia de Fundações, S.A. O projecto de execução da estrutura de contenção foi desenvolvido pela empresa A400, Projectistas e Consultores de Engenharia, Lda, com a colaboração da Geo-Rumo na definição da solução variante.

Este edifício subterrâneo, com uma área bruta de construção de cerca de 12 800 m², tem a capacidade de 480 lugares de estacionamento, desenvolvendo-se em dois pisos. A obra em estudo situa-se junto ao canal de acesso à marina de Lagos, na proximidade directa de arruamentos, do edifício do Tribunal de Lagos e da muralha da Fortaleza de Lagos.

3.2. Zonamento Geotécnico

No âmbito da caracterização geológico-geotécnica dos terrenos interessados pela obra, efectuaram-se 12 furos de sondagem à rotação acompanhados de ensaios SPT, ensaios de bombagem e recuperação e ensaios laboratoriais de determinação da composição granulométrica e dos limites de Atterberg. Estes ensaios revelaram uma grande heterogeneidade relativamente à compacidade e às próprias características do terreno dentro do mesmo estrato.

Definiram-se duas zonas geotécnicas distintas. A Zona Geotécnica 1 (ZG1), com depósitos de aterro até uma profundidade de cerca de 6 m, constituída por areias finas a grossas amareladas, com conchas, fragmentos rochosos (calcários) e seixos. Os resultados dos ensaios SPT neste estrato variam entre 6 e 60 pancadas, correspondendo a solos muito soltos a compactos, segundo a classificação de solos em termos de compacidade de Terzaghi e Peck. A Zona Geotécnica 2 (ZG2) é composta essencialmente por calcarenito amarelado, que se desagrega com a mão em areia com argila. Este estrato apresenta graus de alteração variáveis entre medianamente alterado (W3) e decomposto (W5). Os resultados dos ensaios SPT revelam também alguma heterogeneidade do estrato, variando entre 7 e 60 pancadas.

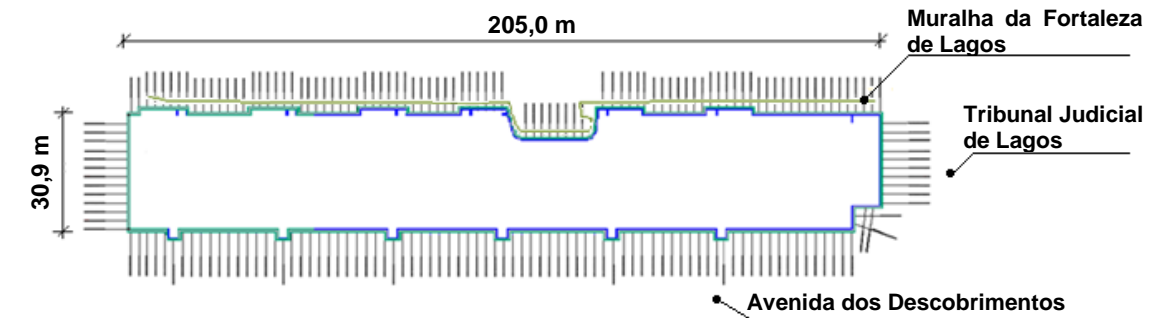
3.3. Solução Adoptada

Face aos condicionalismos existentes, optou-se por uma cortina de contenção periférica impermeável executada com a técnica de CSM, reforçada com perfis metálicos verticais e associada a um nível de ancoragens provisórias no topo.

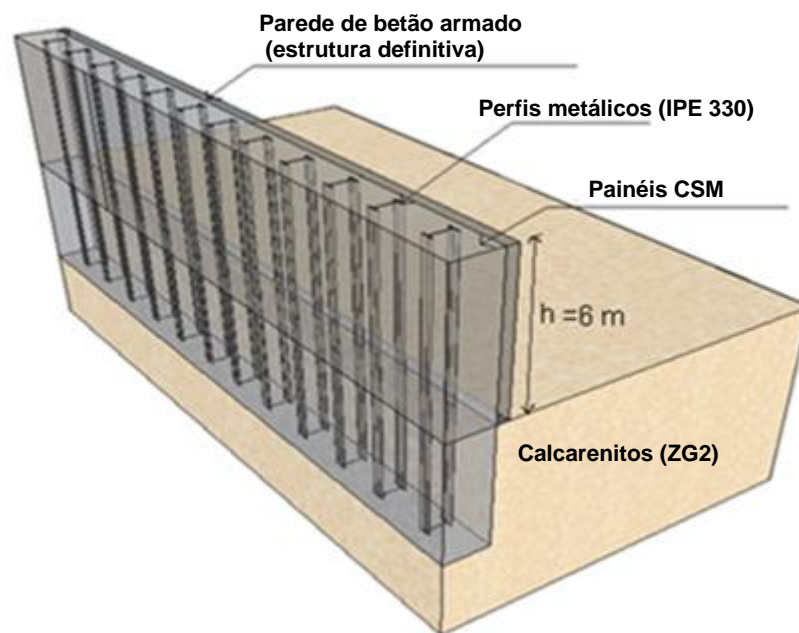
A cortina de contenção, com 0,60 m de espessura, foi executada sequencialmente por painéis primários e secundários com 2,40 m de comprimento e uma sobreposição de 0,20 m, tendo-se realizado no total 262 painéis de CSM. Os painéis foram reforçados com perfis metálicos verticais IPE 330 (FE 430) afastados de 0,70 m. A disposição dos perfis metálicos na secção foi

efectuada de forma a otimizar o momento flector resistente, ou seja, o mais próximo possível da face de escavação, onde as tensões de tracção são máximas. Para garantir a solidarização dos perfis metálicos e permitir a aplicação do pré-esforço nas ancoragens, executou-se uma viga de coroamento ($0,60 \times 0,90 \text{ m}^2$) no topo da cortina. Ao longo do perímetro da escavação foram executadas 196 ancoragens provisórias, inclinadas de 35° , com um afastamento entre si de 2,50 m e um nível de pré-esforço médio de 600 kN.

Em fase definitiva executou-se uma parede de betão armado a partir da base de escavação, betonada contra a parede de CSM. Na Figura 5 apresenta-se a esquematização da solução estrutural adoptada.



a)



b)

Figura 5 – Esquematização da Solução Adoptada: a) Planta da Escavação e da Área Envolvente; b) Aspecto Tridimensional da Solução Estrutural Adoptada

3.4. Observação da Obra

3.4.1. Execução da Escavação e Sistema de Drenagem

Ao longo das várias fases de escavação, a função de impermeabilização da cortina foi garantida, verificando-se que a passagem de água do exterior para o interior da escavação através da parede de CSM foi totalmente impedida.

Com o avanço da escavação verificou-se, como era esperado, a entrada de água pelo seu fundo através dos calcarenitos, o que foi controlado através da instalação do sistema provisório de drenagem. Executaram-se 14 poços de bombagem interligados por uma malha de drenos, distribuídos ao longo da área de escavação. A instalação dos poços foi efectuada gradualmente à medida que a escavação foi avançando, de acordo com o volume de água a extrair. Este sistema foi desactivado em fase definitiva, uma vez que a estrutura contemplou uma laje de fundo estanque.

Na Figura 6 pode observar-se o aspecto geral da obra durante a sua execução, sendo de salientar o bom comportamento da solução adoptada.



Figura 6 – Aspecto Geral da Obra nas várias Fases de Execução: a) Escavação até à Profundidade de 6 m; b) Pormenor da Parede de CSM; c) Regularização do Fundo de Escavação e Aplicação do Betão de Limpeza

3.4.2. Plano de Observação

O plano de observação estabelecido teve como objectivo permitir a medição dos deslocamentos horizontais da parede, dos deslocamentos verticais da parede e da muralha adjacente e dos esforços nas ancoragens ao longo das diferentes fases construtivas. A localização dos equipamentos de monitorização foi definida de acordo com o esquematizado na Figura 7. Os equipamentos de monitorização implementados foram:

- 5 inclinómetros colocados a 0,15 m do tardo da cortina;
- 5 células de carga colocadas nas cabeças das ancoragens;
- 17 alvos topográficos instalados na viga de coroamento e, paralelamente, no alinhamento da muralha.

Para o controlo de segurança da estrutura, definiram-se limites de alerta e de alarme das grandezas medidas através da instrumentação.

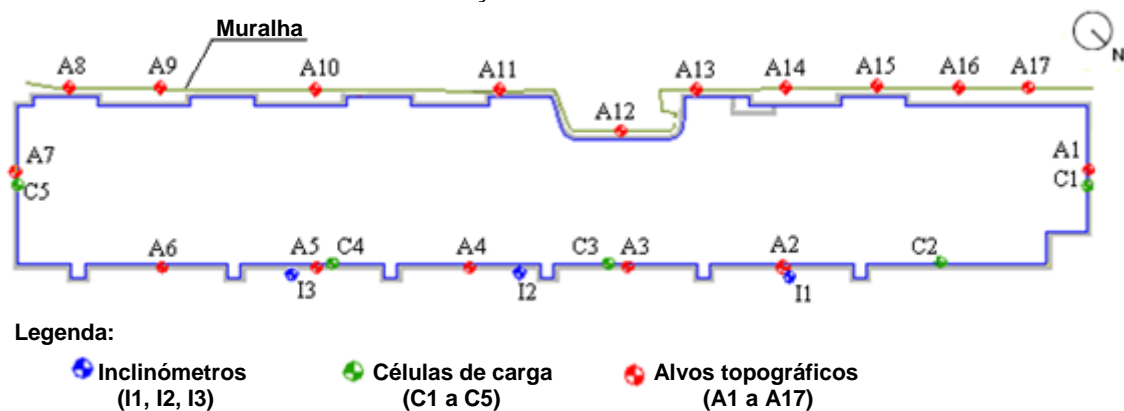


Figura 7 – Localização dos Equipamentos de Monitorização

Efectuaram-se cinco leituras inclinométricas em diferentes fases de execução da escavação. Na Figura 8 encontram-se representadas as envolventes de deslocamentos horizontais da cortina, na direcção perpendicular ao seu desenvolvimento, obtidos através das leituras inclinométricas. Consideram-se positivos os deslocamentos no sentido do interior da escavação.

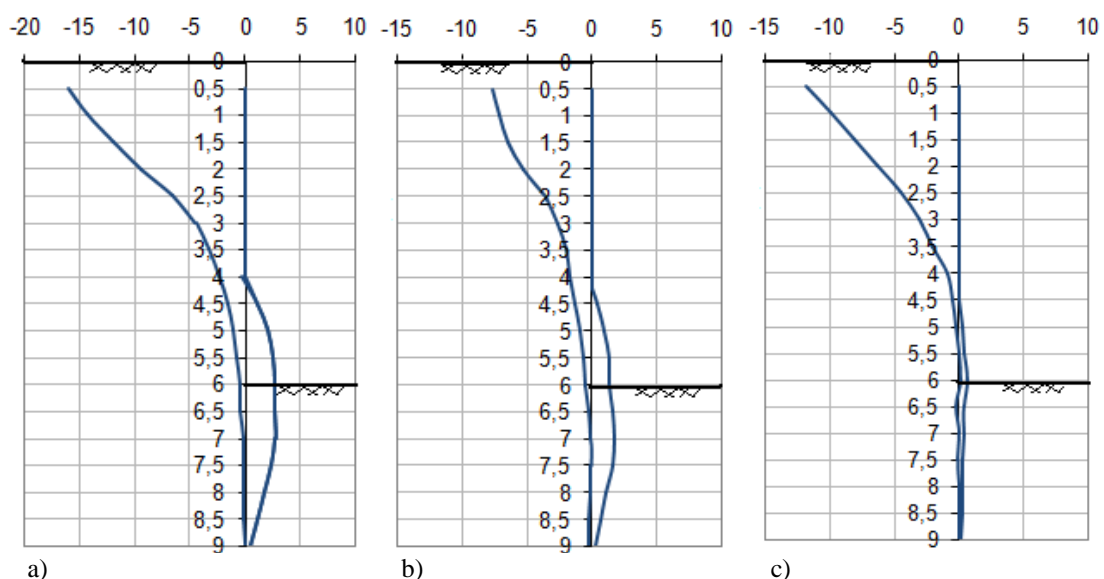


Figura 8 – Envolventes de Deslocamentos Horizontais obtidos através das Leituras Inclinométricas: a) Inclinómetro I1; b) Inclinómetro I2; c) Inclinómetro I3

Os deslocamentos horizontais obtidos foram globalmente pequenos em todas as fases de execução e inferiores aos valores definidos como limite de alerta, tendo os valores máximos sido registados após a escavação até aos 6 m de profundidade (H), como seria expectável. O deslocamento horizontal máximo ($\delta_{H_{max}}$) no sentido do maciço não escavado foi de 16 mm e o deslocamento horizontal máximo no sentido da escavação foi de 3 mm. Relativamente ao deslocamento no sentido do maciço não escavado, a razão $\delta_{H_{max}}/H$ toma o valor de 0,27 % e em relação ao deslocamento no sentido do interior da escavação, obteve-se $\delta_{H_{max}}/H = 0,05\%$. Estes valores estão de acordo com os observados em condições similares em escavações com desempenho satisfatório (Clough & O'Rourke, 1990).

As leituras das células de carga foram efectuadas nas seguintes fases de execução da obra:

- Leitura 1 – após o pré-esforço nas ancoragens;
- Leitura 2 – após a escavação até uma cota entre os 3 m e os 6 m de profundidade;
- Leitura 3 – após a escavação até aos 6 m de profundidade;
- Leitura 4 – antes da execução da estrutura definitiva.

No Quadro 1 apresentam-se os resultados obtidos através das leituras das células de carga.

Quadro 1 – Resultados obtidos através das Leituras das Células de Carga

Célula de Carga	Força na ancoragem (kN)				Variação da força na ancoragem (kN)	
	Leitura 0	Leitura 1	Leitura 2	Leitura 3		
C1	640	590	590	590	- 50 kN	(7,8 %)
C2	640	545	545	540	- 100 kN	(15,6 %)
C3	550	510	510	500	- 50 kN	(9,1 %)
C4	620	580	580	580	- 40 kN	(6,5 %)

Pela análise do Quadro 1, verifica-se que após a operação de pré-esforço ter-se-á atingido o valor mínimo da força na ancoragem e, com o avanço da escavação, terá havido um ligeiro aumento da força até à sua estabilização para uma profundidade de escavação entre os 3 m e os 6 m. Estes resultados estão, aliás, coerentes com os deslocamentos horizontais observados no topo da cortina, uma vez que, após as operações de pré-esforço, o deslocamento no topo da cortina se processou no sentido do maciço não escavado, o que faz com que a força na ancoragem tenda, naturalmente, a diminuir. Como se pode observar pelos resultados obtidos, há uma tendência para a estabilização da força nas ancoragens ao longo do tempo.

Relativamente às leituras efectuadas através dos alvos topográficos, obtiveram-se deslocamentos verticais da parede dentro de valores satisfatórios, tendo-se registado um assentamento máximo de 9 mm, no alinhamento junto à muralha.

4. CONCLUSÕES

A aplicação da técnica de CSM como solução de contenção na obra apresentada permitiu obter um comportamento bastante satisfatório, quer em termos de estabilidade, quer em termos de deformações ao longo das várias fases de escavação, quer ainda no que respeita ao bom funcionamento como elemento de impermeabilização.

Quanto ao acompanhamento do processo de execução dos painéis de CSM na obra estudada, verificou-se uma variação significativa do seu tempo de execução, tendo-se conseguido rendimentos entre 6 m²/h e 13 m²/h.

A análise dos resultados da observação da obra permitiu concluir que:

- os deslocamentos horizontais e verticais da cortina foram globalmente pequenos ao longo das várias fases de escavação, verificando-se uma tendência para a estabilização do deslocamento horizontal da parede ao longo do tempo;
- o deslocamento horizontal máximo no sentido do maciço não escavado foi de 16 mm e o deslocamento horizontal máximo no sentido da escavação foi de 3 mm;
- os deslocamentos foram, em todas as fases de execução da escavação, inferiores aos deslocamentos definidos como limite de alerta, tendo-se garantido a estabilidade da estrutura de contenção dentro de limites de deformação aceitáveis;
- verificou-se uma tendência para a estabilização da força nas ancoragens ao longo do tempo.

O acompanhamento da obra apresentada permitiu perceber que a obtenção de boas soluções com a técnica de CSM depende de diversos factores, como as condições geológico-geotécnicas, os requisitos específicos de cada projecto, a experiência do projectista, a disponibilidade de equipamento apropriado e de pessoal qualificado, entre outras. Tendo presente a quantidade de factores que podem influenciar o processo de execução, salienta-se a grande importância do controlo e da monitorização das obras, especialmente quando se trata de intervenções em meio urbano, tornando assim possível a tomada de medidas de prevenção atempadamente e sem riscos para outras estruturas existentes nas proximidades.

REFERÊNCIAS

- Clough, G. W. & O'Rourke, T. D. (1990). Construction induced movements of insitu walls. *ASCE Geotechnical Special Publication No. 25, Design and Performance of Earth Retaining Structures*, Cornell University, Ithaca, pp. 439-445.
- GEO-RUMO (2008). Futurlagos – Parque de estacionamento da Frente Ribeirinha de Lagos. *Relatório geológico e geotécnico*. Geo-Rumo, Tecnologia de Fundações, S.A., Braga.
- Gerressen, F. W.; Schopf, M. & Stotzer, E (2009). CSM – Cutter Soil Mixing – Worldwide experiences of a young soil mixing method. *Proceedings of International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization*, Okinawa, Japan.
- Lopez, R. A., Majewski, A. & Harvey, T. (2009). Permanent excavation support in urban areas using cutter soil mixing technology: Elliott Avenue case history. *Proceedings of International Foundation Congress and Equipment Expo, Contemporary Topics in Ground Modification, Problem Soils, and Geo-Support, Geotechnical Special Publication No. 187*, ASCE, Orlando, Florida, pp. 185-192.
- Sousa, E. (2009). A Técnica de Cutter Soil Mixing Aplicada a Escavações Urbanas. Aspectos Gerais e Caso de Estudo. Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, FEUP, 182 p.