

ESTRUTURA DE CONTENÇÃO PERIFÉRICA EXECUTADA COM A TECNOLOGIA DE CUTTER SOIL MIXING NO EDIFÍCIO "HOTEL MONTAIGNE" EM CANNES - FRANÇA

SOLUTION OF EARTH RETAINING STRUCTURE USING CUTTER SOIL MIXING TECHNOLOGY AT THE "HOTEL MONTAIGNE" IN CANNES – FRANCE

Peixoto, Artur; *Geo-Rumo, Tecnologia de Fundações, S.A., Braga, Portugal, artur.peixoto@georumo.pt*
Sousa, Estela; *Geo-Rumo, Tecnologia de Fundações, S.A., Braga, Portugal, estela.sousa@georumo.pt*
Gomes, Pedro; *Geo-Rumo, Tecnologia de Fundações, S.A., Braga, Portugal, pedro.gomes@georumo.fr*

RESUMO

O presente artigo descreve os aspectos mais relevantes ao nível do projecto e da execução da estrutura de contenção periférica implementada na obra de ampliação do edifício "Hotel Montaigne", localizado em Cannes, França. Atendendo aos principais condicionamentos existentes, optou-se por propor e conceber uma estrutura de contenção constituída por painéis de solo-cimento executados através da tecnologia de *Cutter Soil Mixing* (CSM), reforçados com perfis metálicos verticais, associada a dois níveis de escoramento metálico provisório. A estrutura de contenção preconizada, além de permitir a escavação de face vertical em condições de segurança, foi concebida de forma a funcionar em fase definitiva como elemento de fundação dos elementos estruturais interiores em conjunto com a parede em betão armado executada a partir da base de escavação e micro-estacas interiores de fundação. Neste artigo são apresentados os principais resultados da modelação, instrumentação, observação e controlo de qualidade da obra.

ABSTRACT

This paper describes the general design and execution aspects of a peripheral retaining wall to the construction of the underground floors of "Hotel Montaigne" building, located at Cannes, France. Considering the geological and geotechnical constraints, the presence of high water table and the surrounding conditions near existing buildings, it was performed a retaining wall of soil-cement panels executed using the Cutter Soil Mixing (CSM) technology. The soil-cement panels were reinforced with vertical steel piles and temporarily supported by two levels of steel pipe struts. Besides allowing a safe vertical excavation and limiting the water inflow to the interior of the excavation, the retaining structure was designed as a secondary foundation element of the final structure together with a concrete wall executed against the CSM wall and the principal foundation elements constituted by micropiles. The main results of modelling and quality control of the work are also presented.

1 - INTRODUÇÃO

O presente artigo refere-se à estrutura de contenção realizada para suporte das escavações previstas para a obra de ampliação do edifício "Hotel Montaigne", localizado na cidade de Cannes, em França. O hotel existente foi remodelado e ampliado, tendo ganho um piso adicional em altura e um novo bloco com sete pisos elevados e três pisos subterrâneos (Figura 1). A estrutura de contenção apresentada foi concebida para permitir as escavações necessárias à execução dos pisos subterrâneos do novo bloco do hotel.

No enquadramento descrito, procurou-se conceber uma solução de contenção que privilegiasse a minimização de interferências e perturbações na área envolvente da obra, garantindo o seu funcionamento em condições de segurança durante e após a execução dos trabalhos e, simultaneamente, permitisse limitar a afluência de água ao recinto de escavação. A solução preconizada consistiu numa parede contínua de painéis de solo-cimento realizados através da tecnologia de *Cutter Soil Mixing* (CSM), armados verticalmente com perfis em aço laminado, associada a dois níveis de escoramento metálico horizontal.

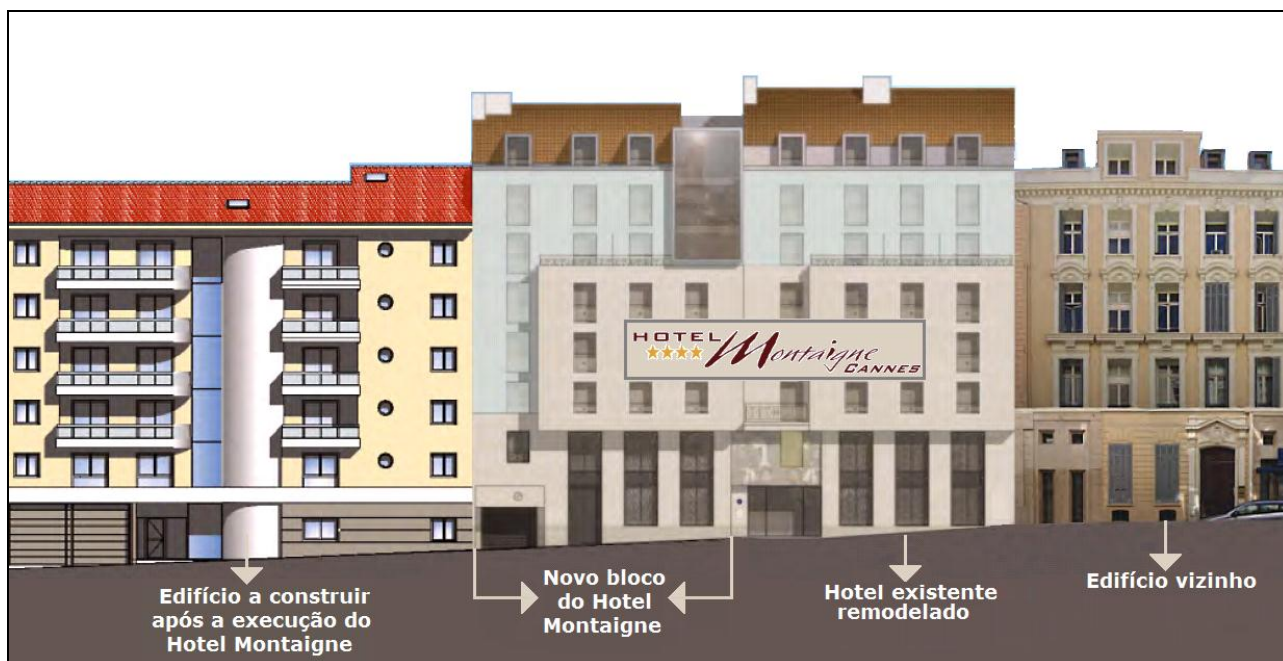


Figura 1 – Enquadramento da Obra (vista da Rua Montaigne)

O recinto da escavação, com uma forma trapezoidal, apresenta uma área em planta de aproximadamente 300 m² e encontra-se delimitado por arruamentos e edifícios existentes (Figura 2).

O principal desafio encontrado neste projecto consistiu na execução da escavação com uma profundidade média de 9 m numa zona densamente edificada, na presença de terrenos com características mecânicas muito variáveis, apresentando na generalidade reduzidos valores de resistência e deformabilidade elevada até profundidades abaixo da base de escavação, na presença de nível freático próximo da superfície.



Figura 2 – Vista Aérea da Localização da Obra

A tecnologia de CSM deriva da técnica de *Deep Soil Mixing* e consiste na mistura mecânica do solo *in situ* com cimento, formando painéis de secção transversal rectangular (Fiorotto et al., 2005). A aplicação desta tecnologia não obriga à remoção do solo *in situ* durante a execução dos painéis, não havendo por isso descompressão do terreno durante a execução da estrutura de contenção, o que permite minimizar as interferências com a área envolvente. A estrutura de contenção constituída por painéis de CSM armados verticalmente foi concebida com o objectivo de satisfazer simultaneamente as seguintes funções principais no âmbito da obra em estudo:

- contenção do terreno para permitir a escavação de face vertical com o mínimo de perturbações na área envolvente;
- fundação e ancoragem dos elementos estruturais interiores;
- limitação da afluência de água ao interior do recinto de escavação.

2 - PRINCIPAIS CONDICIONAMENTOS

2.1 - Geologia e Geotecnia

A caracterização dos terrenos existentes no local da obra foi realizada com base em dois estudos geotécnicos, realizados em diferentes fases.

Numa fase inicial, em que o acesso ao terreno se encontrava limitado, foi realizado um estudo geotécnico que envolveu a instalação de um piezómetro para a medição do nível freático, a execução de um ensaio de furação destrutivo e de um ensaio pressiométrico (PMT – *Pressiometer Ménard Test*). Durante a realização do ensaio de furação destrutivo foi efectuado o registo contínuo dos parâmetros de furação, como a velocidade de avanço e a pressão do fluido de injeção, cujas variações permitiram inferir sobre o estado de compactidade dos materiais a diferentes profundidades, permitindo igualmente detectar zonas de vazios ou de descompressão do maciço.

Numa segunda fase foi realizado um estudo geotécnico complementar que incluiu a instalação de um piezómetro, a execução de dois ensaios de furação destrutivos e de dois ensaios PMT e a recolha de amostras intactas para a realização de ensaios laboratoriais. Os ensaios laboratoriais tiveram como objectivo identificar o tipo de solo e as suas características mecânicas, destacando-se a realização de ensaios triaxiais.

Os resultados recolhidos nas campanhas de prospecção realizadas no terreno interessado pela obra colocaram em evidência a presença de três camadas distintas (Figura 3):

- Aterros heterogéneos de natureza argilosa e siltosa detectados desde a superfície até uma profundidade de cerca de 5 m (Zona Geotécnica 1 – ZG1);
- Argilas arenosas detectadas até profundidades da ordem de 12 m, subjacentes aos aterros heterogéneos (Zona Geotécnica 2 – ZG2);
- Substrato rochoso (grés) com passagens alteradas menos compactas, subjacentes à camada anterior (Zona Geotécnica 3 – ZG3).

Relativamente ao nível freático, a sua ocorrência foi detectada a sensivelmente 3.5 m de profundidade.

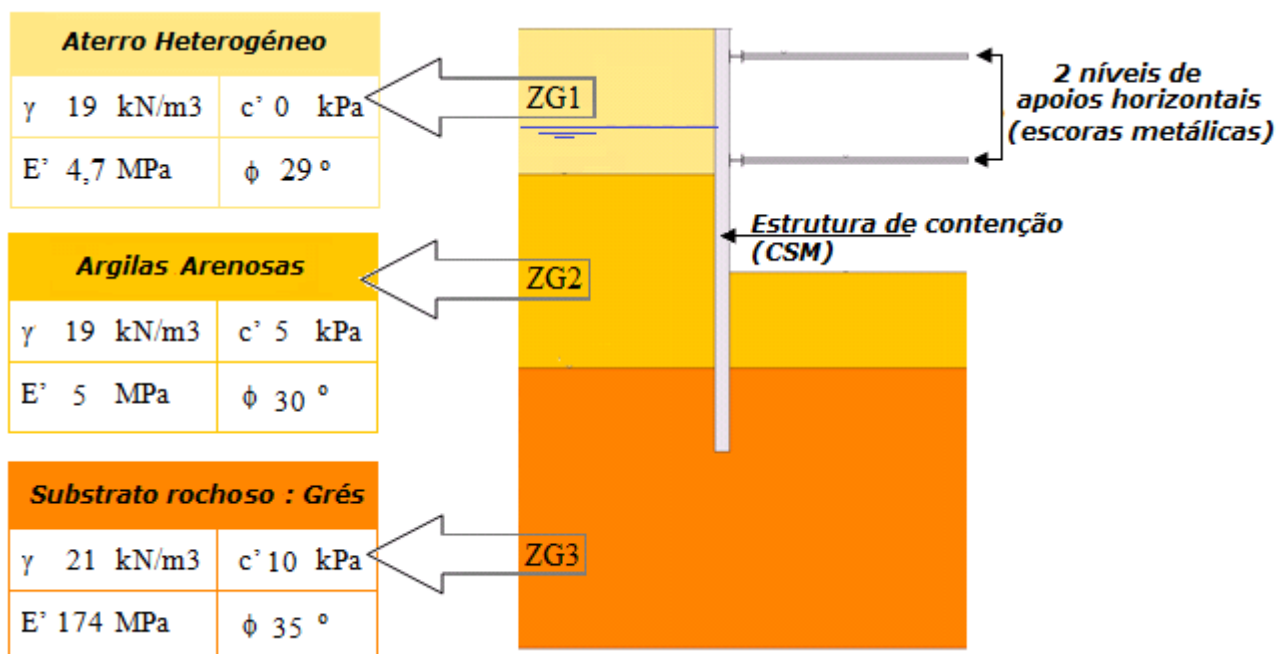


Figura 3 – Principais Parâmetros Geomecânicos e Corte-Tipo da Escavação

2.2 - Condicionamentos de vizinhança

O recinto de escavação localiza-se numa zona urbana, o que determinou que uma das principais preocupações durante a concepção da solução e a execução dos trabalhos fosse a garantia do funcionamento, em condições de segurança, dos edifícios e arruamentos localizados na proximidade da obra. A obra apresenta as seguintes confrontações directas:

- a norte: arruamento (Rua *Montaigne*);
- a sul: edifício com três pisos elevados;
- a oeste: edifício do hotel existente (três pisos subterrâneos e sete pisos elevados);
- a este: edifício de pequeno porte a demolir antes do início dos trabalhos de escavação para, numa fase posterior, dar lugar a um novo edifício.

Na fase de instalação do equipamento de CSM em obra, não tinham sido iniciados os trabalhos de demolição do edifício que confrontava directamente com a obra no alçado este, o que dificultou as operações de instalação do equipamento (Figura 4).



Figura 4 – Instalação do Equipamento

2.3 - Condicionamentos de ordem sísmica

A obra em estudo localiza-se na cidade de Cannes, em França, tendo sido classificada em relação à intensidade e ao risco sísmico, de acordo com as normas em vigor no país. Segundo o “Décret n° 2010-1255” de 22 de Outubro de 2010, são distinguidas cinco zonas no território francês, por ordem crescente de intensidade sísmica, como é possível observar na Figura 5: muito baixa (1), baixa (2), moderada (3), média (4) e forte (5).

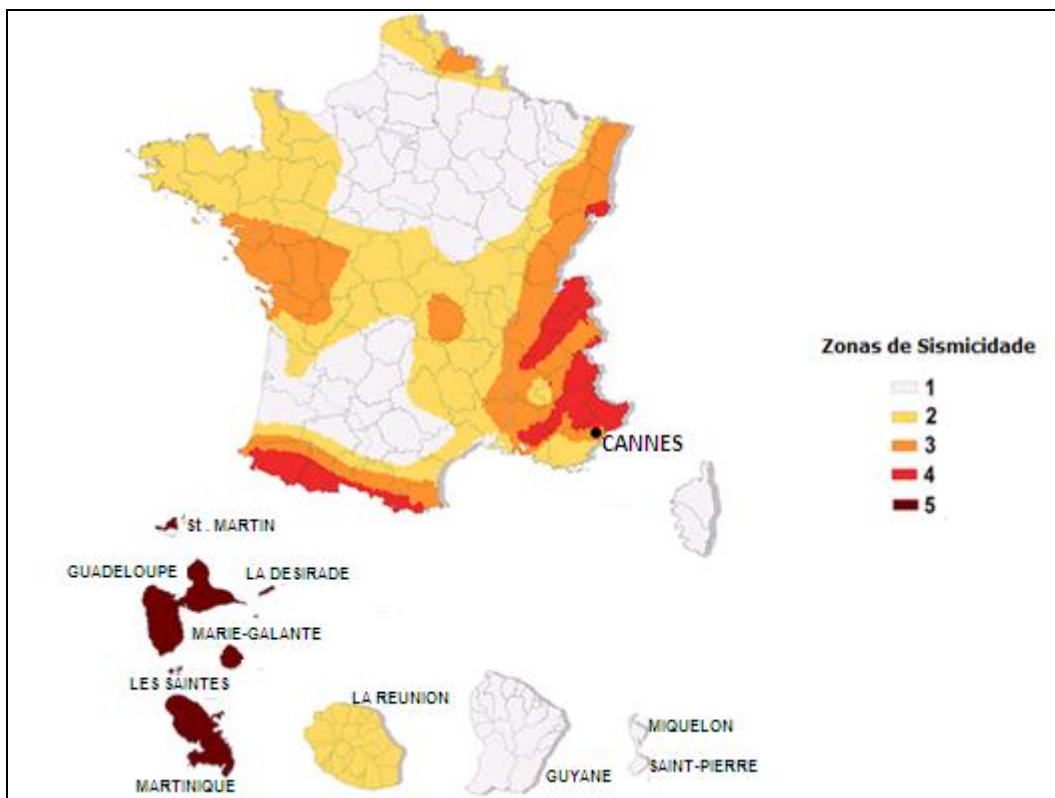


Figura 5 – Zonas de Intensidade Sísmica do Território Francês (“Décret n° 2010-1255” de 22 de Outubro de 2010)

A cidade de Cannes localiza-se numa zona de sismicidade moderada. Segundo o mesmo documento são definidas quatro categorias de importância para os edifícios, por ordem crescente de importância: Categoria I, II, III e IV. O edifício a construir insere-se na Categoria de Importância II (edifício de habitação colectiva com altura até 28 m).

3 - DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO ADOPTADA

Tendo por base os condicionalismos existentes, optou-se por propor e conceber uma solução de contenção periférica constituída por uma cortina contínua de painéis CSM, travada provisoriamente por dois níveis de escoramento metálico.

A estrutura de contenção foi executada sequencialmente por painéis de solo-cimento primários e secundários, com secção transversal rectangular de dimensões 2.40 m x 0.55 m e um comprimento de sobreposição mínimo de 0.20 m entre painéis adjacentes de forma a garantir uma ligação eficaz entre si ao longo de toda a altura de escavação.

A limitação da afluência de água ao interior da escavação foi uma das preocupações durante a concepção do projecto, tendo para tal sido definido um comprimento mínimo de encastramento de 3 m no substrato rochoso (ZG3). Desta forma, os painéis de CSM foram executados com um comprimento médio de 15 m.

Para acomodar a totalidade dos impulsos provocados pelo terreno e pelas sobrecargas de utilização das áreas localizadas a tardo da contenção, o impulso hidrostático e as cargas verticais transmitidas em fase definitiva, os painéis CSM foram armados verticalmente com perfis do tipo IPE 450 (em aço S 275 JR) afastados de 1.10 m (dois perfis em cada painel). A colocação dos perfis no interior dos painéis CSM resulta numa protecção destes elementos contra eventuais fenómenos de encurvadura pelo confinamento conferido, permitindo adicionalmente minimizar fenómenos de corrosão com origem na agressividade do terreno envolvente.

Realizou-se ainda, a partir da base de escavação, uma parede de revestimento em betão armado com 0.15 m de espessura, ligada aos perfis IPE da estrutura de contenção através de perfis metálicos HEA horizontais.

A estrutura de contenção foi concebida para, em conjunto com as micro-estacas de fundação executadas abaixo da laje de fundo no interior da escavação, acomodar os esforços verticais transmitidos pela estrutura definitiva. Na figura 6 encontra-se representada a planta da estrutura de contenção e o respectivo escoramento.

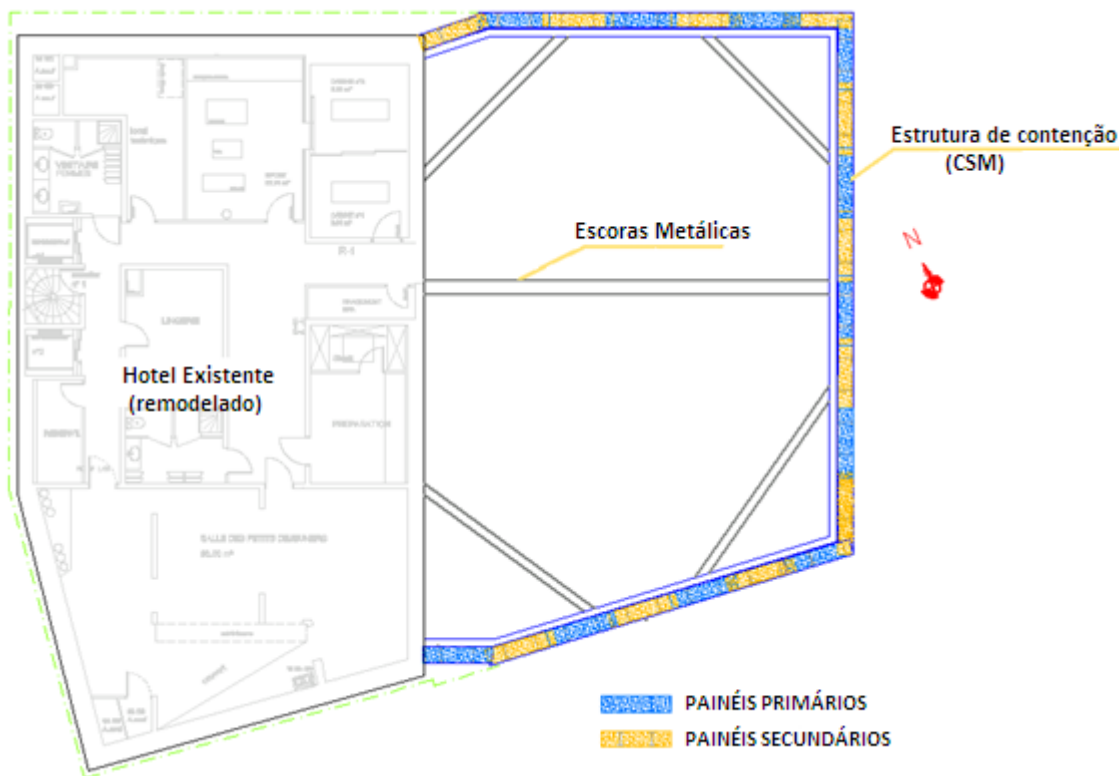


Figura 6 - Planta da Estrutura de Contenção e do Escoramento Horizontal

O processo de execução de um painel de CSM compreende essencialmente duas fases:

- Fase de corte: a ferramenta de corte é conduzida verticalmente até à profundidade definida em projecto, desagregando o terreno com auxílio das rodas dentadas, sendo adicionado simultaneamente um ligante hidráulico (geralmente calda de cimento);
- Fase de extracção e mistura: é realizada a mistura do solo *in situ* com o restante volume de ligante hidráulico procedendo-se à homogeneização da mistura.

A fase de corte processa-se durante o avanço descendente da vara até à profundidade necessária. À medida que a ferramenta de corte avança em profundidade, vai sendo adicionado o ligante hidráulico (em geral, calda de cimento). A velocidade da ferramenta de corte e o volume de ligante hidráulico adicionado devem ser ajustados pelo operador para otimizar o aproveitamento da energia e criar uma massa de material homogéneo que permita facilmente a descida e a subida do equipamento. Em condições difíceis no que respeita ao tipo de solo envolvido ou para a execução de painéis de CSM até grandes profundidades poderá ser necessário o uso de bentonite durante a fase de corte, sendo a calda de cimento adicionada ao painel apenas durante a fase de extracção e mistura. Atingida a cota definida em projecto, inicia-se então a subida da vara invertendo a rotação das rodas de corte e continuando a injeção calda de cimento a baixa pressão. Na figura 7 é apresentado esquematicamente o processo de execução descrito.

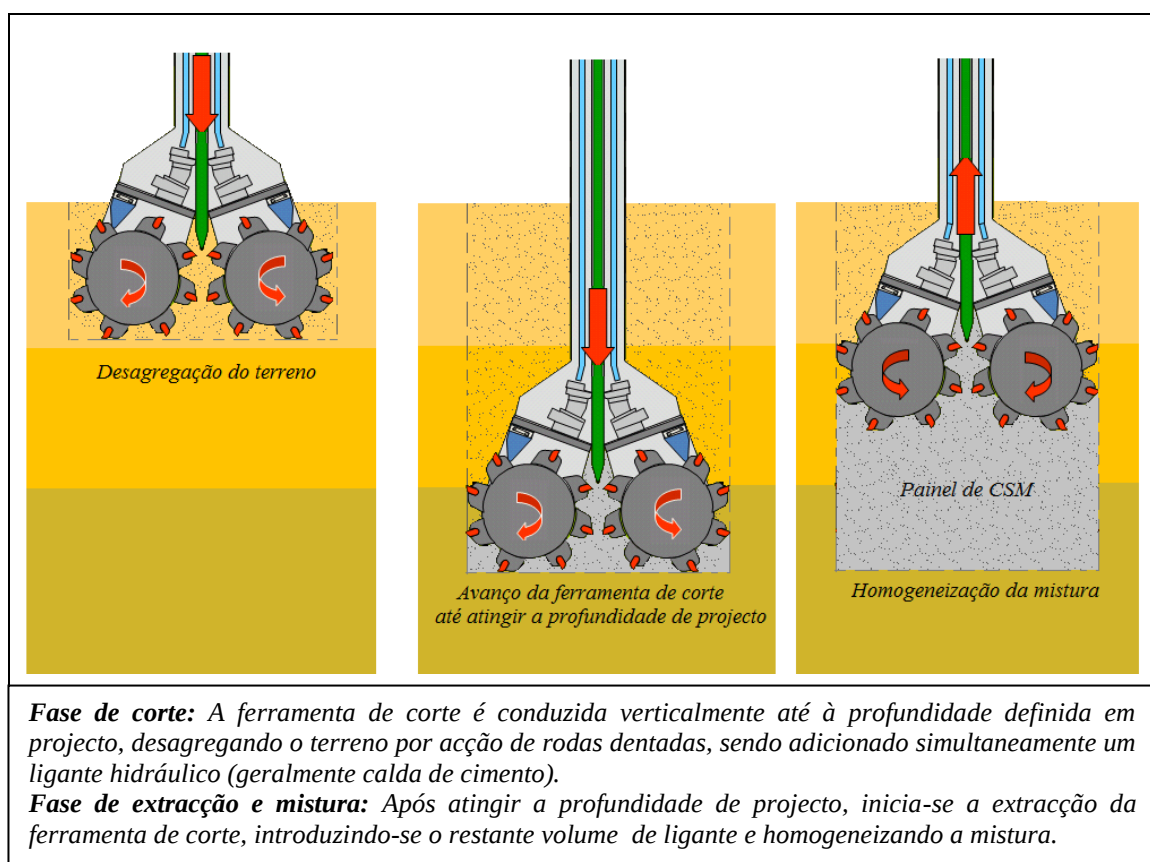


Figura 7 - Ilustração das Principais Fases de Execução de um Painel de CSM

4 - MODELO DE ANÁLISE DA ESTRUTURA DE CONTENÇÃO

A análise da estrutura de contenção foi realizada recorrendo a um modelo numérico de elementos finitos, através do programa de cálculo Plaxis®. Os terrenos foram modelados com os parâmetros geomecânicos indicados no ponto 2.1, tendo-se adoptado o modelo de comportamento *Hardening Soil*. A análise realizada englobou o estudo das secções representativas de todos os alçados da estrutura de contenção. Na figura seguinte pode observar-se, a título exemplificativo, o modelo de análise de uma das secções estudadas: Secção A (secção representativa do alçado norte).

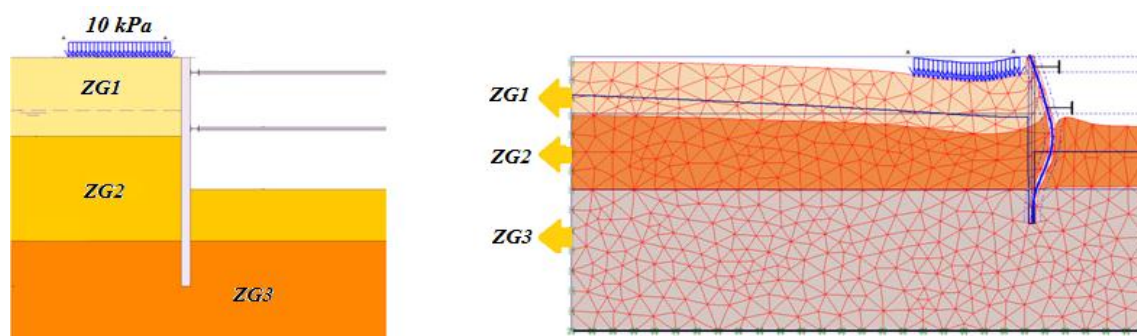


Figura 8 - Secção A (secção representativa do alçado norte): Corte-Tipo (à esquerda) e Modelo de Análise com a Deformada na Última Fase de Escavação (à direita)

No quadro seguinte são apresentados os valores dos deslocamentos horizontais máximos da cortina obtidos na análise numérica da Secção A.

Quadro 1- Deslocamentos Horizontais Máximos da Cortina – Análise Numérica da Secção A

	Deslocamento horizontal (mm)
No topo da cortina	2.0
Ao longo da altura da cortina	18.5

Dadas as características da zona de intervenção e a respectiva envolvente, foram definidos os seguintes deslocamentos horizontais máximos aceitáveis: 5 mm no topo da cortina e 20 mm ao longo da altura da cortina. Na modelação numérica de todas as secções estudadas foram previstos valores inferiores aos referidos, tendo-se verificado durante a execução da obra que os valores de deslocamentos horizontais obtidos foram ainda ligeiramente inferiores aos valores previstos.

Os painéis de CSM foram dimensionados para uma tensão de compressão não superior a 2 MPa e para um valor do módulo de deformabilidade superior ou igual a 1 GPa. No caso da resistência à compressão, considerou-se um factor de segurança de 2, impondo-se assim que os provetes de solo-cimento recolhidos e submetidos a ensaios de resistência à compressão uniaxial em laboratório apresentassem um valor mínimo de tensão de rotura à compressão de 4 MPa.

5 - EXECUÇÃO DOS TRABALHOS

O processo de execução da estrutura de contenção iniciou-se com a realização, a partir da superfície, dos painéis de solo-cimento armados, antes de qualquer trabalho de escavação (Figura 9).



Figura 9 - Equipamento, Ferramenta de Corte (à esquerda) e Execução de um Painel de CSM (à direita)

Os painéis de CSM foram executados recorrendo a um equipamento constituído por uma grua base sobre rastros, munida de uma torre vertical (RTG RG19T) com altura total de 23 m, associada a um sistema de vara *kelly* com 20 m de altura. Utilizou-se uma ferramenta de corte do tipo BCM 5, acoplada na extremidade inferior da vara *kelly*, cujas características geométricas permitiram obter a geometria pretendida para os painéis de solo-cimento (secção transversal de dimensões 2.40 m x 0.55 m).

Os perfis verticais foram inseridos imediatamente após a execução de cada painel de CSM, antes do seu endurecimento, e posicionados junto à face interior dos painéis para facilitar a posterior solidarização das vigas de distribuição metálicas para apoio do escoramento interior (Figuras 10 e 11).



Figura 10 - Execução de um Painel de CSM (à esquerda) e Perfis Verticais IPE (à direita)



Figura 11 - Pormenor da Viga de Distribuição Metálica (directamente ligada aos perfis verticais da estrutura de contenção)

A estrutura de contenção contínua foi obtida pela realização sequencial de painéis de CSM primários e secundários, com um comprimento de sobreposição entre si de 0.20 m. Os painéis secundários podem ser executados imediatamente após a execução dos painéis primários, processo designado por "soft-into-soft" ou após o endurecimento dos painéis primários, processo designado por "soft-into-hard" (Gerressen et al., 2009). Estas duas hipóteses são possíveis, dada a versatilidade da ferramenta de corte para realização dos painéis de CSM, permitindo a aplicação da tecnologia a todos os tipos de solo, embora não se consiga a mesma eficácia em todos os tipos de solo. De acordo com a experiência de utilização em diferentes tipos de solos, pode afirmar-se que esta tecnologia apresenta melhores resultados quando aplicada em solos arenosos, obtendo-se em solos argilosos e siltosos resistências inferiores para as mesmas quantidades de cimento.

A fase seguinte consistiu na execução de uma pequena escavação para permitir a execução da viga de coroamento. Uma vez executada a viga de coroamento, procedeu-se à escavação até cerca de 0.50 m abaixo do 1º nível de escoramento, seguindo-se a execução da viga de distribuição metálica e a instalação do escoramento metálico. A escavação para execução do 2º nível de escoramento foi realizada de forma análoga à descrita para o 1º nível.

Após ser atingida a profundidade máxima de escavação, foi executada a laje de fundo e a parede de revestimento em betão armado, acompanhada do processo de desactivação do escoramento à medida que foram sendo executados sucessivos travamentos materializados pelas lajes da estrutura interior do edifício.

A Figura 12 mostra uma vista parcial da obra durante a fase de escavação.



Figura 12 – Vista parcial da Obra durante a Fase de Escavação

6 - CONTROLO DE QUALIDADE

A variabilidade dos parâmetros de resistência e de deformabilidade do solo-cimento resultante da aplicação da tecnologia de CSM está directamente relacionada com o grau de homogeneidade da mistura e é influenciada por diversos factores como por exemplo, o tipo de solo envolvido, a presença de água, o modo como se processa a distribuição do ligante na massa de solo desagregado, a presença de ar como um componente, as reacções químicas que se verificam durante o processo de mistura, entre outras. Por estas razões, é necessário ter cuidados especiais e efectuar um controlo eficaz, tanto durante a execução como posteriormente na avaliação da qualidade da mistura de acordo com as exigências de projecto.

Uma das principais vantagens da aplicação da tecnologia de CSM relativamente a outras técnicas alternativas, além dos aspectos económicos e ambientais (utilização do solo *in situ* como material de construção), é a possibilidade de controlo em tempo real, por parte do manobrador do equipamento, dos parâmetros de execução (Larsson, 2005). Durante a execução de um painel de CSM, o manobrador dispõe de um painel de instrumentos (Figura 13) que lhe permite monitorizar e corrigir, em tempo real, parâmetros como a velocidade de avanço das rodas de corte, a quantidade de ligante adicionado, a densidade de fluídos envolvidos (relação A/C), a verticalidade do painel, entre outros.

Além do controlo efectuado pelo manobrador do equipamento durante a execução dos painéis de CSM, o controlo é realizado também a outros níveis, através de ensaios laboratoriais complementados com eventuais ensaios de campo, em painéis de teste executados para o efeito, que permitem calibrar os parâmetros de execução. Uma vez calibrados os parâmetros de execução inicia-se a realização dos painéis de CSM da estrutura de contenção, dos quais são também recolhidas amostras para a realização de ensaios laboratoriais.

No Quadro 2 encontram-se resumidos os valores médios obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples realizados sobre provetes recolhidos dos painéis da estrutura de contenção na obra apresentada. De forma a verificar a evolução da resistência à compressão ao longo do tempo, realizaram-se ensaios de resistência à compressão simples aos 7, 14 e 28 dias de idade. Analisando os valores médios apresentados, verifica-se que a resistência média dos provetes aos 7 dias de idade é de 5 MPa, superior ao valor exigido em projecto (4 MPa), o que permite concluir que os pressupostos considerados no dimensionamento se encontram do lado da segurança.

O controlo durante a execução foi ainda efectuado através do Plano de Observação e Instrumentação implementado, que incluiu a implementação de alvos topográficos na estrutura de contenção e nas bandas de laje, inclinómetros no terreno localizado no tardo da estrutura de contenção e extensómetros instalados nas escoras metálicas. As leituras efectuadas nos aparelhos de monitorização ao longo da execução da escavação permitiram verificar que os deslocamentos ocorridos foram ligeiramente inferiores aos previstos, encontrando-se abaixo dos valores estabelecidos como limites de alerta para cada uma das fases de escavação.

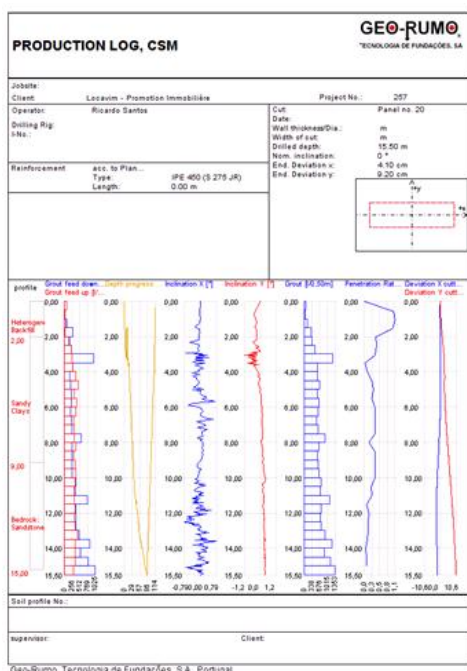


Figura 13 - Relatório de Produção de um Painel de CSM (à esquerda) e Painel de Controlo do Equipamento (à direita)

Quadro 2- Valores Médios obtidos nos Ensaios de Resistência à Compressão Simples (provetes ensaiados aos 7, 14 e 28 dias de idade)

Idade dos provetes	7 dias	14 dias	28 dias
Tensão de rotura à compressão uniaxial (MPa)	5.0	7.0	7.8

7 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A execução da cortina contínua de painéis CSM na obra em estudo constituiu uma opção apropriada e vantajosa do ponto de vista técnico, económico e ambiental. O objectivo principal de garantir a minimização de interferências e perturbações na área envolvente da obra foi conseguido, como se comprovou pelos resultados obtidos nos aparelhos de monitorização instalados no âmbito do Plano de Observação e Instrumentação da obra. Durante a escavação verificou-se que os painéis de CSM permitiram reduzir a afluência de água ao interior da mesma, tendo-se conseguido impedir totalmente a passagem de água para o interior da escavação ao longo da altura da cortina.

O campo de aplicação da tecnologia de CSM é muito abrangente, tanto ao nível do tipo de solo que pode servir de base ao tratamento como em relação ao tipo de obras onde a sua aplicação se torna técnica e economicamente viável. Como foi salientado no presente artigo, a qualidade do material resultante da aplicação deste tecnologia depende de diversos factores, sendo fulcral o controlo e a monitorização das obras, especialmente quando se trata de intervenções em meio urbano. Relativamente à experiência da empresa Geo-Rumo com esta tecnologia, é de referir que a mesma tem sido aplicada com sucesso em Portugal e em França na execução de cortinas de impermeabilização, estruturas de contenção e melhoramento de solos de fundação.

REFERÊNCIAS

- Fiorotto, R., Schöpf, M. and Stötzer, E. (2005). Cutter Soil Mixing (CSM) An innovation in Soil mixing for creating Cut-off and Retaining walls. *16 ICSMGE: International Conference on soil mechanics and geotechnical engineering*, Osaka-Japan.
- Gerressen, F. W., Schopf, M. and Stotzer, E. (2009). CSM – Cutter Soil Mixing – Wordwide experiences of a young soil mixing method. *International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization*, Okinawa, Japan.
- Larsson, S., 2005. State of Practice Report – Execution, Monitoring, and Quality Control. *International Conference on Deep Mixing. Best Practice and Recent Advances. Deep Mixing '05*, Stockholm, Sweden.