

ESTRUTURA DE CONTENÇÃO PERIFÉRICA EXECUTADA COM A TECNOLOGIA DE CUTTER SOIL MIXING NO EDIFÍCIO "MAY FLOWER" EM ANTIBES - FRANÇA

SOLUTION OF EARTH RETAINING STRUCTURE USING CUTTER SOIL MIXING TECHNOLOGY AT THE "MAY FLOWER" IN ANTIBES - FRANCE

Gomes, Pedro; Artur Peixoto, Consultores Geotecnia, Lda, Braga, Portugal, pedro.gomes@apgeotecnia.pt
Peixoto, Artur; Artur Peixoto, Consultores Geotecnia, Lda, Braga, Portugal, artur.peixoto@apgeotecnia.pt
Borges, Rui; Artur Peixoto, Consultores Geotecnia, Lda, Braga, Portugal, rui.borges@apgeotecnia.pt

RESUMO

O presente artigo descreve os aspetos mais relevantes ao nível do projeto e da execução da estrutura de contenção periférica provisória implementada na obra de construção do edifício "May Flower", localizado em Antibes, 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 quatro níveis de escoramento metálico provisório, pré-esforçados nos três níveis inferiores. 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 temporary peripheral retaining wall to the construction of the underground floors of "May Flower" building, located at Antibes, 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 four levels of steel pipe struts, prestressed in the lower three levels. 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 provisória realizada para suporte das escavações previstas para a obra de construção do edifício "May Flower", localizado na cidade de Antibes, em França. O edifício é constituído por rés-do-chão e sete pisos elevados e quatro pisos subterrâneos (Figura 1). A estrutura de contenção apresentada foi concebida para permitir as escavações necessárias à execução dos pisos subterrâneos do novo edifício.



Figura 1 – Enquadramento da Obra (brochura do empreendimento)

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 que 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 quatro níveis de escoramento metálico horizontal.

O recinto da escavação apresenta uma área em planta de aproximadamente 317 m² e encontra-se delimitado por arruamentos e edifícios existentes (Figura 2).

O principal desafio encontrado neste projeto consistiu na execução da escavação com uma profundidade média de 11 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, e na presença de nível freático próximo da superfície.



Figura 2 – Vista Aérea da Localização da Obra (Google Maps)

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 retangular (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 objetivo de satisfazer simultaneamente as seguintes funções:

- contenção do terreno para permitir a escavação de face vertical com o mínimo de perturbações na área envolvente,
- 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, por uma empresa francesa especializada, a Sol-Essais.

Numa fase inicial, antes da demolição do edifício existente e em que o acesso ao terreno se encontrava limitado, foi realizado um estudo geotécnico que envolveu a execução de um furo a destrutivo com a realização de ensaios pressiométricos (PMT – *Pressiometer Ménard Test*) e um furo com amostragem contínua (carotagem) onde se instalou um piezómetro para a medição do nível freático. Durante a realização do ensaio de furação a destrutivo foi efetuado 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 compacidade dos materiais a diferentes profundidades, permitindo igualmente detetar zonas de vazios ou de descompressão do maciço.

Numa segunda fase foi realizado um estudo geotécnico complementar que incluiu uma furação a destrutivo com a realização de ensaios PMT e uma outra perfuração com amostragem contínua com

recolha de amostras intactas para a realização de ensaios laboratoriais. Os ensaios laboratoriais tiveram como objetivo identificar o tipo de solo e as suas características mecânicas, destacando-se a realização de ensaios triaxiais. Neste último furo foram também realizados ensaios de permeabilidade a várias profundidades.

Os resultados recolhidos nas duas campanhas de prospeção realizadas no terreno interessado pela obra colocaram em evidência a presença de três camadas distintas, como apresentado no corte-tipo da Figura 3 e com os parâmetros geomecânicos do Quadro 1, sugeridos pela empresa responsável pela prospeção.

- Aterros heterogêneos e solos de cobertura detetados desde a superfície até uma profundidade de cerca de 2 m (Zona Geotécnica 1 – ZG1);
- Depósitos aluvionares predominantemente finos com passagens de areia e cascalho até profundidades da ordem de 12 m, subjacentes aos aterros heterogêneos (Zona Geotécnica 2 – ZG2);
- Depósitos aluvionares com camadas alternadas entre areia cascalhenta e areia siltosa, a partir dos 12 m de profundidade (Zona Geotécnica 3 – ZG3).

Relativamente ao nível freático, a sua ocorrência foi detetada a sensivelmente 2,2 m de profundidade.

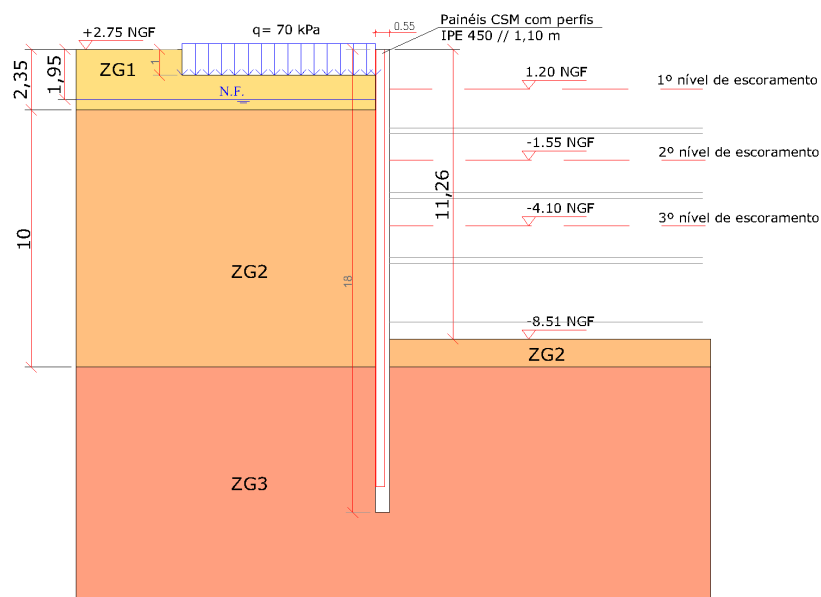


Figura 3 – Corte-tipo da escavação

Quadro 1 – Principais parâmetros geomecânicos

Parâmetro	ZG1	ZG2	ZG3
γ (kN/m ³)	20,0	20,0	20,0
ϕ_u (°)	25,0	27,0	22,0
c_u (kPa)	5,0	10,0	15,0
E_{ref} (MPa)	27,6	21,4	51,3

2.2 - Condicionamentos de vizinhança

O recinto de escavação localiza-se numa zona urbana, com edifícios de grande altura, o que determinou que uma das principais preocupações durante a conceção 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 diretas:

- a nordeste: arruamento (Boulevard Maréchal Foch);
- a noroeste: arruamento (Avenue Général Maiziére);
- a sudeste: edifício R+8;
- a sudoeste: edifício R+6.

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 quatro níveis de escoramento metálico, sendo os três níveis inferiores pré-esforçados.

A estrutura de contenção foi executada sequencialmente por painéis de solo-cimento primários e secundários, com secção transversal retangular 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 projeto, tendo para tal sido definido um comprimento mínimo de encastramento de 6 m a partir do fundo de escavação. Assim, os painéis de CSM foram executados com um comprimento médio de 17 m.

Para acomodar a totalidade dos impulsos provocados pelo terreno e pelas sobrecargas de utilização das áreas localizadas a tardo da contenção e o impulso hidrostático, 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 proteção destes elementos contra eventuais fenómenos de encurvadura pelo confinamento conferido, permitindo adicionalmente minimizar fenómenos de corrosão com origem na agressividade do terreno envolvente.

A partir da base de escavação foi construído depois todo o edifício em betão armado, dimensionado para resistir a todos os esforços em fase definitiva.

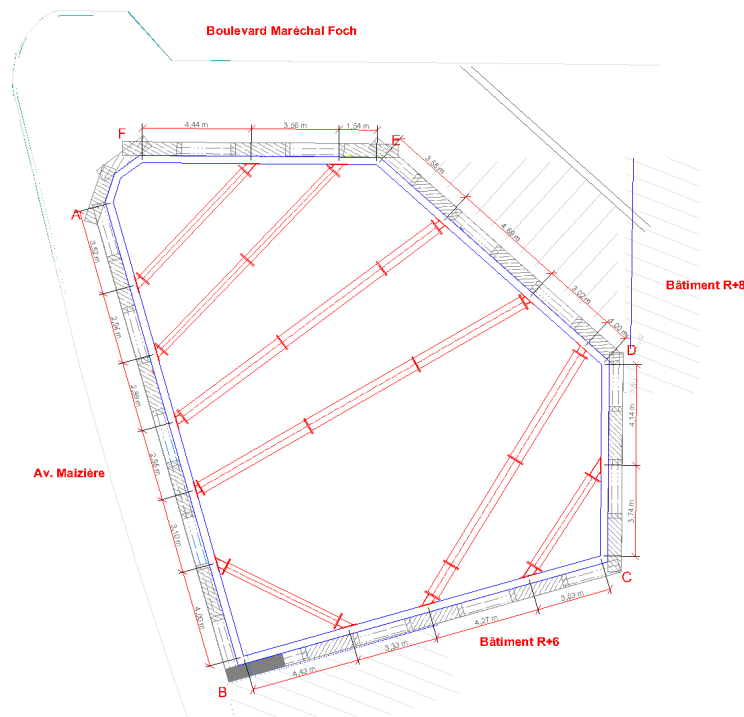
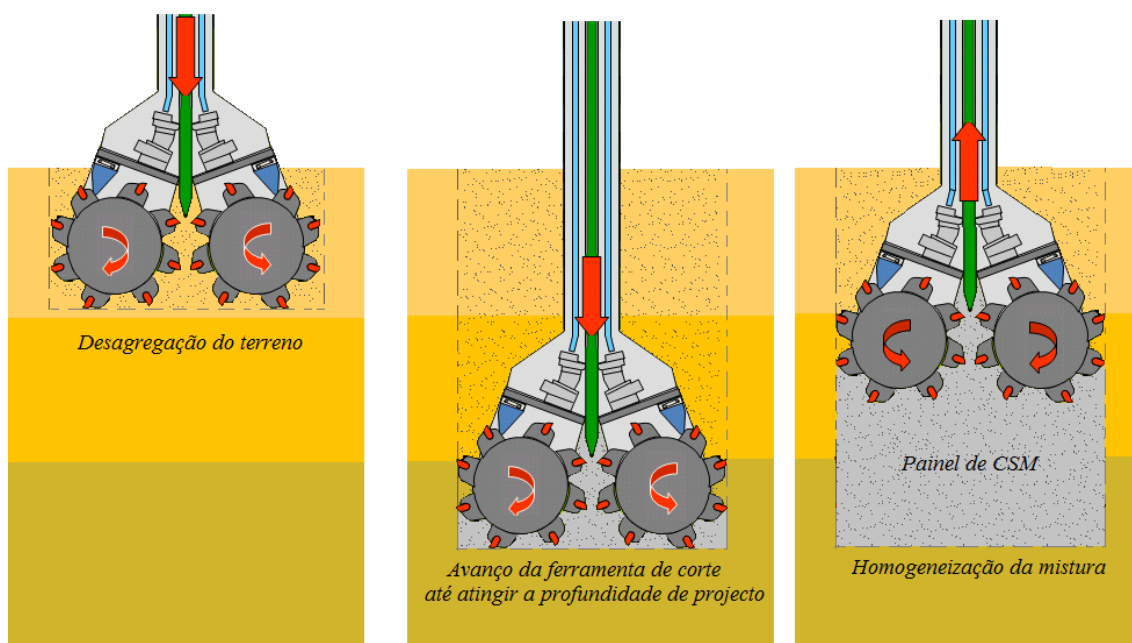


Figura 4 – Planta da estrutura da contenção e escoramento horizontal

O processo de execução de um painel de CSM compreende essencialmente duas fases, a fase de corte e a fase de extração e 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 a descida e a subida da ferramenta facilmente. Em condições geológicas difíceis 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 extração e mistura.

Atingida a cota definida em projeto, 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 5 é apresentado esquematicamente o processo de execução descrito.



Fase de corte: A ferramenta de corte é conduzida verticalmente até à profundidade definida em projecto, desagregando o terreno por acção de rodas dentadas, sendo adicionado simultaneamente um ligante hidráulico (geralmente calda de cimento).

Fase de extracção e mistura: Após atingir a profundidade de projecto, inicia-se a extracção da ferramenta de corte, introduzindo-se o restante volume de ligante e homogeneizando a mistura.

Figura 5 – 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 adotado 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 5 (secção representativa do alçado sudeste, edifício R+8).

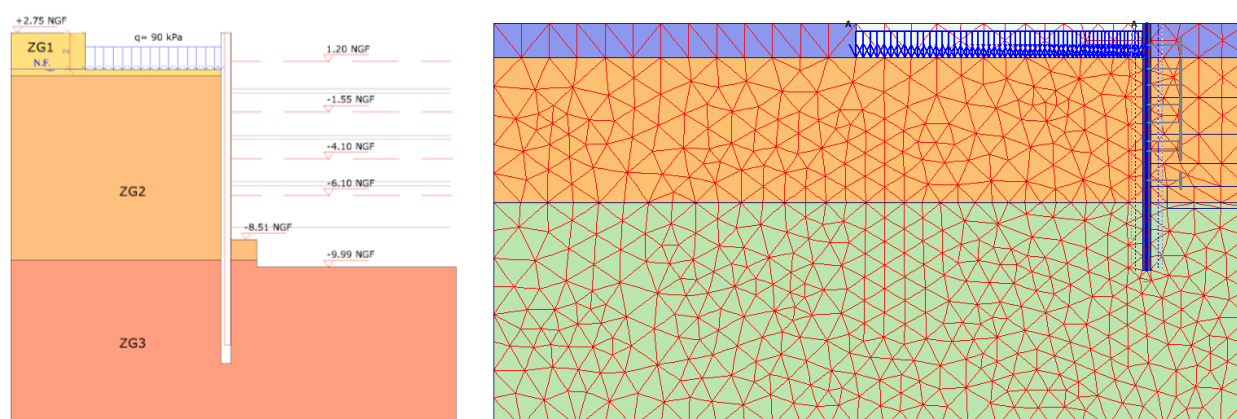


Figura 6 – Secção 5: Corte-tipo (à esquerda) e modelo de análise em Plaxis® (à direita)

Para simular o processo construtivo da estrutura de contenção e escavação foram consideradas as seguintes fases de cálculo:

Fase 1 – Escavação até à cota +0,40 NGF;

Fase 2 – Execução do primeiro nível de escoramento à cota +1,20 NGF;

Fase 3 – Escavação até à cota -2,35 NGF;

Fase 4 – Execução do segundo nível de escoramento à cota -1,55 NGF e aplicação de pré-esforço;

- Fase 5** – Escavação até à cota -4,90 NGF;
- Fase 6** – Execução do terceiro nível de escoramento à cota -4,10 NGF e aplicação de pré-esforço;
- Fase 7** – Escavação até à cota - 6,90 NGF (cortes 4, 5 e 6);
- Fase 8** – Execução do quarto nível de escoramento à cota -6,10 NGF e aplicação de pré-esforço (cortes 4, 5 e 6);
- Fase 9** – Escavação até à profundidade máxima (cota -8,51 NGF);
- Fase 9b** – Escavação do poço do elevador (cortes 5 e 6);
- Fase 10** – Construção da laje de fundo;
- Fase 11** – Remoção do quarto nível de escoramento (cortes 4, 5 e 6);
- Fase 12** – Execução da laje R-3;
- Fase 13** – Remoção do terceiro nível de escoramento;
- Fase 14** – Execução da laje R-2;
- Fase 15** – Remoção do segundo nível de escoramento;
- Fase 16** – Execução da laje R-1;
- Fase 17** – Remoção do primeiro nível de escoramento.

Como exemplo, no quadro seguinte são apresentados os valores dos deslocamentos horizontais máximos da cortina obtidos na análise numérica da Secção 5.

Quadro 2 – Deslocamentos horizontais máximos da cortina – análise numérica da secção 5

	Deslocamento horizontal (mm)
No topo da cortina	5.0
Ao longo da altura da cortina	39.7

Dadas as características da zona de intervenção e respetiva envolvente, foram definidos os limites de deslocamento horizontal aceitáveis de 5 mm no topo da cortina e 40 mm ao longo da altura da cortina. Na modelação numérica de todas as secções estudadas foram previstos valores inferiores a estes.

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 fator 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.

O comprimento dos painéis de CSM foi definido a partir da verificação de segurança da rutura por levantamento hidráulico, através da metodologia proposta por Mandel e adaptada por Cassan (Cassan, 1994), sendo depois verificada a segurança da rutura hidráulica por erosão interna (“piping”).

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.

Os painéis de CSM foram executados recorrendo a um equipamento constituído por uma grua base sobre rastos, 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.



Figura 7 – Fotografia do equipamento utilizado na execução de painéis CSM (fotografia do autor)

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, procedeu-se à escavação até cerca de 0,50 m abaixo da cota do primeiro nível de escoramento, seguindo-se a execução da viga de distribuição metálica e a instalação do escoramento metálico. A escavação para execução do segundo nível de escoramento foi realizada de forma análoga à descrita para o primeiro nível. A Figura 8 mostra uma fotografia desta fase da obra.



Figura 8 – Fotografia da obra antes da aplicação do segundo nível de escoramento (gentileza da Geo-Rumo)

Após a colocação do segundo nível de escoramento e antes de se continuar com a escavação, foi aplicado o pré-esforço nas escoras com a carga prevista em projeto. O pré-esforço foi aplicado com dois macacos hidráulicos apoiados entre a escora tubular e a mesa que permite a constituição do ângulo da escora relativamente à contenção. De forma a uniformizar a aplicação do pré-esforço, foi utilizada uma única bomba hidráulica ligada aos dois macacos através de um "T", como apresentado na Figura 9.

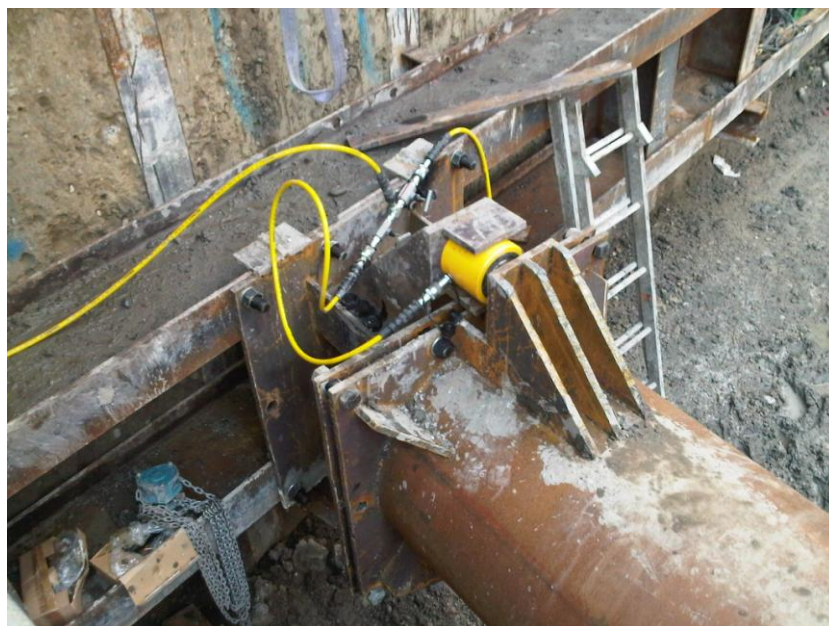


Figura 9 – Fotografia do sistema de aplicação de pré-esforço (gentileza da Geo-Rumo)

Na Figura 10 é apresentada a sequência de aplicação do pré-esforço numa das escoras.

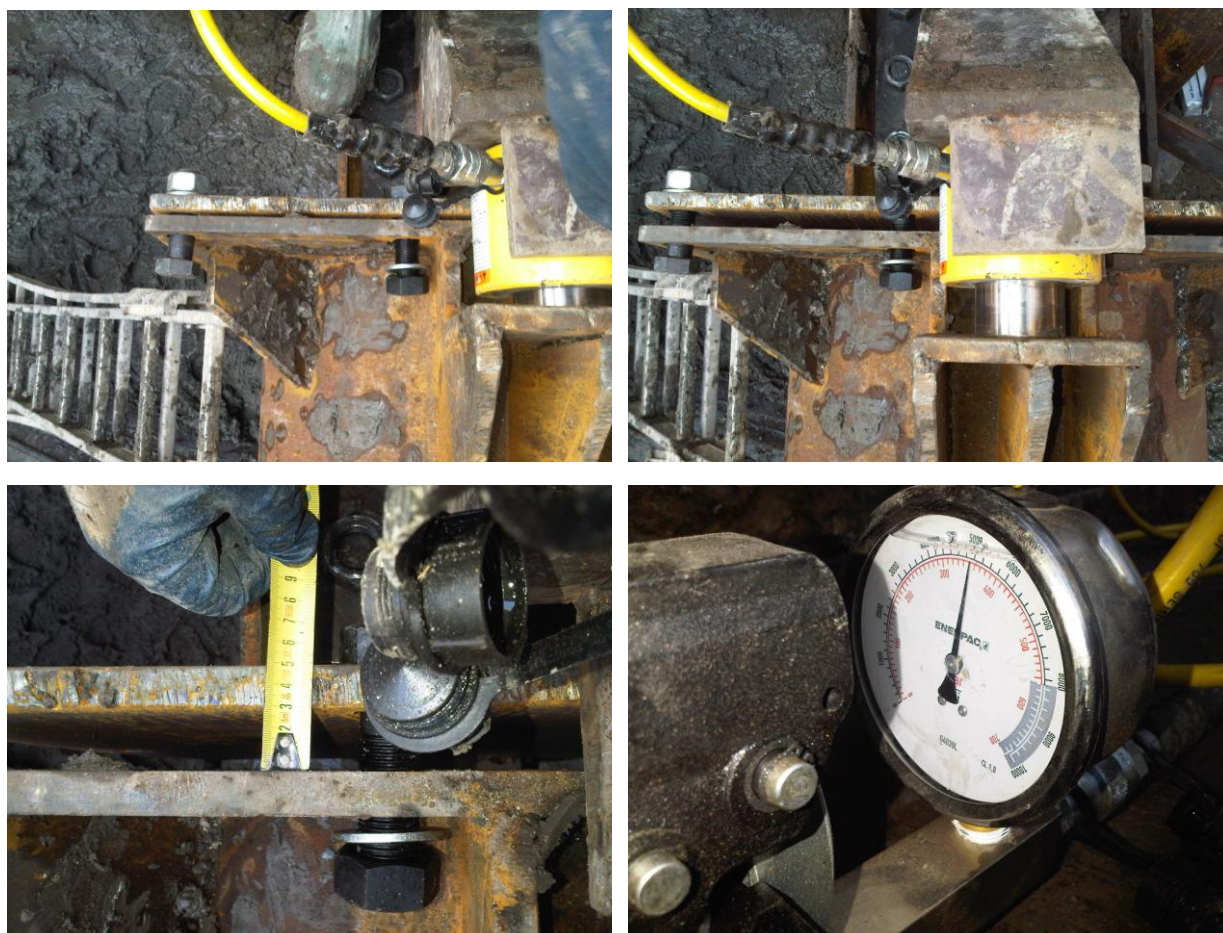


Figura 10 – Aplicação do pré-esforço: a) Posição inicial; b) Posição final; c) Medição da deformação; d) Verificação da pressão na bomba hidráulica (gentileza da Geo-Rumo)

Os terceiro e quarto níveis de escoramento seguiram a mesma sequência de execução do segundo nível, ou seja, escavação até ao nível do escoramento, montagem, aplicação de pré-esforço, escavação para o nível seguinte.

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

6 - CONTROLO DE QUALIDADE

A variabilidade dos parâmetros de resistência e de deformabilidade do solo-cimento resultante da aplicação da tecnologia de CSM está diretamente relacionada com o grau de homogeneidade da mistura e é influenciada por diversos fatores 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 reações químicas que se verificam durante o processo de mistura, entre outras. Por estas razões, é necessário ter cuidados especiais e efetuar um controlo eficaz, tanto durante a execução como posteriormente na avaliação da qualidade da mistura de acordo com as exigências de projeto.

Uma das principais vantagens da aplicação da tecnologia de CSM relativamente a outras técnicas alternativas, além dos aspetos 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 painel de instrumentos, como apresentado na Figura 11, 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) e a verticalidade do painel, entre outros.

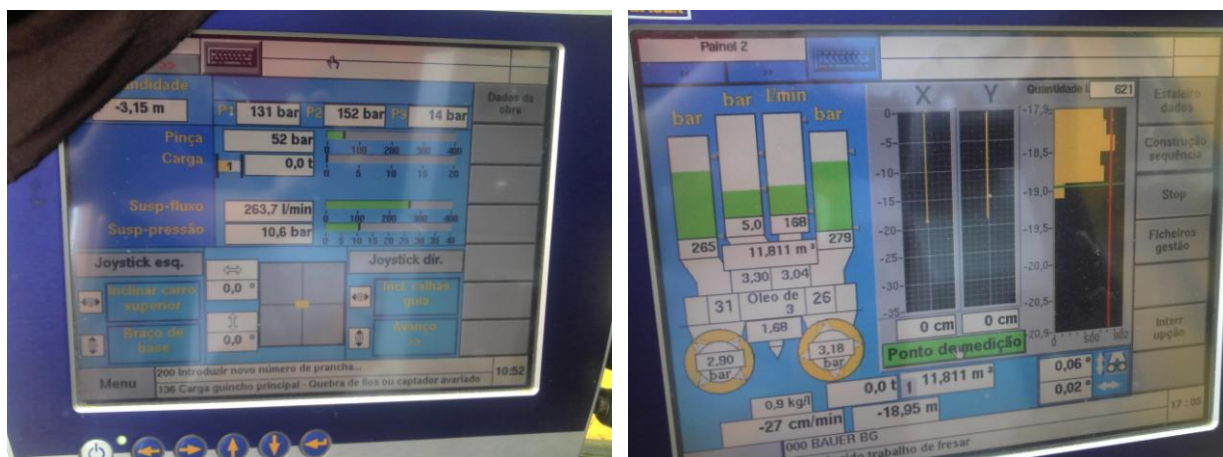


Figura 11 – Painel de controlo do equipamento: Controlo da torre à esquerda e do Cutter à direita (fotografias de execução de um painel CSM em Cannes, fotografias do autor)

Além do controlo efetuado 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 3 encontram-se resumidos os valores mínimos 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 e 28 dias de idade. Analisando os valores mínimos apresentados, verifica-se que a resistência mínima dos provetes aos 7 dias de idade é de 4,5 MPa, superior ao valor exigido em projeto a 28 dias (4 MPa), o que permite concluir que os pressupostos considerados no dimensionamento se encontram do lado da segurança.

Quadro 3 - Valores mínimos obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples (provetes ensaiados aos 7 e 28 dias de idade)

Idade dos provetes	7 dias	28 dias
Tensão de rotura à compressão uniaxial (MPa)	4,5	7,0

O controlo durante a escavação foi efetuado através do Plano de Observação e Instrumentação implementado, que incluiu a colocação de alvos topográficos na estrutura de contenção, inclinómetros no terreno localizado no tardo da estrutura de contenção e extensómetros instalados nas escoras metálicas.

As leituras verificadas nos inclinómetros mostraram deformações superiores às previstas nas modelações numéricas, sendo que apenas em um dos inclinómetros, correspondente à confrontação do arruamento a noroeste, as deformações ultrapassaram os valores de alerta. Esta situação levou a que fosse aumentada a frequência das leituras de todos os instrumentos de monitorização. Apesar da deformação da cortina acima do esperado, os alvos colocados nos edifícios vizinhos não apresentaram deslocamentos.

As deformações máximas em cada fase de execução dos trabalhos verificaram-se abaixo da base de escavação, sendo por isso de difícil correção. No entanto foi sempre conseguido uma ligeira recuperação das deformações com a aplicação do pré-esforço no escoramento.

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.

Embora se tenham verificado deformações na cortina em profundidade, não foram detetados deslocamentos nas estruturas vizinhas, pelo que o objetivo de garantir a minimização de interferências e perturbações na área envolvente da obra foi conseguido. 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 fatores, sendo fulcral o controlo e a monitorização das obras, especialmente quando se trata de intervenções em meio urbano. Relativamente à experiência dos autores com esta tecnologia, é de referir que a mesma foi aplicada com sucesso em Portugal e em França na execução de cortinas de impermeabilização, estruturas de contenção e melhoramento de solos de fundação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Geo-Rumo, Tecnologia de Fundações, S.A. as fotografias cedidas e a autorização para redação e publicação do presente artigo.

REFERÊNCIAS

- Cassan, M. (1994). *Aide-mémoire d'hydraulique souterraine*, 2^e ed., Presses des ponts, Paris, France.
- 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 – Worldwide 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.