

Aplicação da tecnologia Cutter Soil Mixing em estruturas de contenção

Peixoto, Artur¹

Artur Peixoto, Consultores Geotecnia

Gomes, Pedro²

Artur Peixoto, Consultores Geotecnia

RESUMO: No presente artigo é descrita a tecnologia Cutter Soil Mixing (CSM) como solução de construção de paredes de contenção periférica, apresentando-se as suas características, vantagens relativamente a outras tecnologias utilizadas em contenções, e o modo de dimensionamento da solução de contenção com painéis CSM, podendo-se adaptar a contenções escoradas, ancoradas ou escavações em top-down. No final apresentam-se quatro casos de obra, duas contenções escoradas em que uma é pré-esforçada e duas suportadas por bandas de laje, onde a utilização desta tecnologia se demonstrou importante para a solução da escavação em meio urbano.

PALAVRAS CHAVE: Escavações Urbanas, Escavações Profundas, Cutter Soil Mixing, CSM, Contenção Periférica.

1. INTRODUÇÃO

A contínua concentração da população mundial em grandes centros urbanos obriga à construção de grandes áreas habitáveis em cada vez menores áreas superficiais. Este evento conduz tanto a um aumento da altura das edificações como do aproveitamento do subsolo.

Devido à limitação do espaço e ao confinamento das áreas disponíveis, as escavações têm de ser efetuadas em face vertical, exigindo estruturas de contenção na proximidade de edifícios ou outras estruturas que devam ser preservadas.

Tendo ainda em consideração o aumento da preocupação da população com questões ambientais, torna-se necessário a procura por soluções que minimizem o impacto ambiental das edificações, seja durante a exploração como durante a construção. Desta forma, ao longo do tempo têm sido desenvolvidas técnicas inovadoras e versáteis que permitam a utilização dos solos locais como material de construção através da sua mistura in situ com agentes estabilizadores.

O presente artigo apresenta a tecnologia Cutter Soil Mixing (CSM) como uma solução para a construção de cortinas de contenção de face

¹ Peixoto, Artur, artur.peixoto@apgeotecnia.pt, Praça da Justiça, 168, 4715-125 Braga, Portugal

² Gomes, Pedro, pedro.gomes@apgeotecnia.pt, Praça da Justiça, 168, 4715-125 Braga, Portugal

vertical, impermeável, com capacidade de atingir grandes profundidades de geometria conhecida e que utiliza o solo como material de construção.

Mostrando projetos recentes e bem-sucedidos, é possível afirmar que a tecnologia CSM é uma solução interessante técnica e economicamente, tendo sido aplicada em várias obras um pouco por todo o mundo. Assim, apresentam-se neste artigo quatro obras onde foi utilizada esta tecnologia para a construção de paredes de contenção em face vertical em meios urbanos.

2. DESCRIÇÃO DA TECNOLOGIA CSM

A tecnologia Cutter Soil Mixing deriva da tecnologia de Deep Soil Mixing (DSM), combinando os seus conceitos com alguns dos princípios de execução das paredes moldadas, como a utilização da hidrofresa e a geometria dos painéis obtidos, como mostra a Figura 1. A ferramenta de corte para execução dos painéis de CSM é constituída por dois conjuntos de rodas de corte que giram em torno de eixos horizontais para produzir painéis de solo-cimento de secção transversal retangular, ao contrário do que é usual na tecnologia de DSM em que se recorre a ferramentas de corte que giram em torno de eixos verticais para executar colunas de solo-cimento [Stoetzer et al., 2006].



Figura 1. Equipamento de CSM com rotação em torno de eixos horizontais e vista de um painel de CSM

A ferramenta de corte é acoplada na parte inferior de uma vara *kelly*, associada a uma grua de rastros munida de torre vertical.

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 homogêneo 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 pretendida, inicia-se então a subida da vara invertendo a rotação das rodas de corte continuando a injeção calda de cimento a baixa pressão. Na Figura 2 é mostrado esquematicamente o processo de execução descrito.

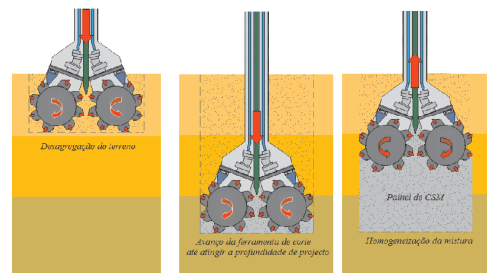


Figura 2. Ilustração das Principais Fases de Execução de um Painel de CSM

Uma das particularidades desta tecnologia é o facto de permitir incorporar o solo *in situ* na própria estrutura de contenção, sendo a estrutura de contenção executada sequencialmente por painéis primários e secundários com um comprimento de sobreposição entre si definido em projeto de forma a obter uma parede contínua de CSM. O facto de esta tecnologia permitir a utilização do solo *in situ* como material de constru-

ção, evitando grandes volumes de material a vazadoiro, constitui uma vantagem do ponto de vista ambiental e económico relativamente a tecnologias tradicionais como por exemplo as cortinas de estacas ou as paredes moldadas. Uma segunda vantagem que importa salientar consiste no conhecimento da geometria exata dos painéis em profundidade, uma vez que o equipamento permite a monitorização em tempo real dos desvios da ferramenta de corte durante o seu avanço em profundidade, sendo possível proceder à correção do seu posicionamento em qualquer instante. O processo de mistura do ligante hidráulico com o solo desagregado pode ser influenciado por diversos fatores. Para a obtenção de painéis de CSM com as características adequadas, assegurando a homogeneidade e a reprodutibilidade das características do material resultante, é essencial um controlo eficaz dos parâmetros de execução como a velocidade da ferramenta de corte, o volume de calda de cimento adicionado em profundidade, os desvios da ferramenta de corte, entre outros (Bringiotti et al., 2009). Refere-se por último a vantagem de esta tecnologia permitir o atravessamento de todos os tipos de solo, embora a eficácia de aplicação não seja igual em todos os tipos de solo. Geralmente obtêm-se melhores resultados em solos arenosos, obtendo-se em solos argilosos e siltsos resistências inferiores para as mesmas quantidades de cimento.

Como se encontra ilustrado na Figura 3, a utilização de painéis de solo-cimento com secção transversal retangular realizados através da tecnologia de CSM para a execução de estruturas de contenção apresenta vantagens quando comparada com a utilização de colunas de solo-cimento obtidas nos métodos DSM que recorrem a ferramentas de corte que giram em torno de eixos verticais (Fiorotto et al., 2005), podendo destacar-se as seguintes vantagens principais:

- redução do volume de solo tratado para obter a mesma secção efetiva de tratamento e a consequente redução de custos associada a esse facto;
- redução do número de juntas da parede;

- possibilidade do uso de diferentes tipos de elementos de reforço dos painéis, cujo posicionamento no próprio painel também pode ser otimizado.

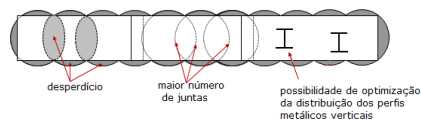


Figura 3. Comparação da geometria retangular dos painéis CSM com as colunas dos métodos de DSM

3. SOLUÇÃO DE CONTENÇÃO

A solução de contenção periférica executada com a tecnologia Cutter Soil Mixing mais utilizada é a construção de uma parede contínua de sucessivos painéis com 2,4 m de largura e espessura constante de 55 a 80cm dependendo projeto.

De forma a garantir uma parede contínua, os painéis são executados sequencialmente entre painéis primários e secundários, com um comprimento de sobreposição entre si de 0,20 m de modo a assegurar uma boa ligação entre painéis adjacentes em profundidade, como apresentado na Figura 4.

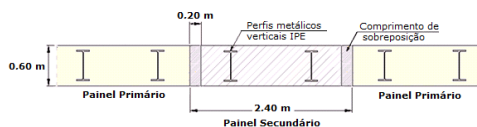


Figura 4. Painéis primários e secundários da cortina de contenção em CSM

Os painéis são executados com um comprimento suficiente para garantir a estabilidade estrutural do fundo e minimizar a afluência de água ao recinto de escavação.

Normalmente é necessário reforçar os painéis para este resistir a esforços fletores. A metodologia mais comum é a colocação de perfis metálicos no interior do painel imediatamente após a sua execução. A preferência por perfis IPE prende-se pela melhor relação módulo de flexão por peso. A colocação dos perfis no

interior dos painéis CSM resulta também numa proteção destes contra eventuais fenómenos de encurvadura pelo confinamento conferido, permitindo adicionalmente minimizar fenómenos de corrosão com origem na agressividade do terreno envolvente.

Os perfis metálicos poderão ser solidarizados entre si através de uma viga de coroamento em betão armado no topo superior da cortina.

A estabilidade horizontal da cortina é feita de forma semelhante aos restantes tipos de contenção periférica, como por exemplo escoramento horizontal entre alçados ou para a base de escavação, ancoragens provisórias ou definitivas, ou ainda através de lajes definitivas nas soluções de top-down. Devido à fraca resistência ao corte dos painéis CSM, os esforços horizontais deverão ser redistribuídos pelas ancoragens ou escoras através de vigas de distribuição.



Figura 5. Fotografia dos perfis HEA de ligação da laje

As vigas de distribuição ou lajes que resistirão aos esforços horizontais são apoiadas na parede de contenção através de perfis metálicos, como apresentado na Figura 5.

No caso de contenções periféricas definitivas é comum a construção de uma parede de revestimento em betão armado contra os painéis CSM. Esta parede pode ser construída de cima para baixo com o avanço da escavação ou de baixo para cima com a construção da estrutura. É comum construir a parede de revestimento com uma espessura entre 15 e 20cm.

Na figura seguinte apresenta-se um corte-tipo de uma contenção periférica executada com painéis CSM e escorada provisoriamente.

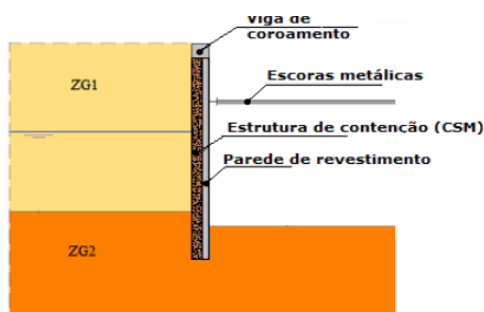


Figura 6. Corte-tipo da estrutura de contenção do empreendimento "Villa Paradisio".

4. METODOLOGIA DE CÁLCULO

Para a análise da estrutura de contenção são definidas uma ou mais secções de cálculo que em conjunto representam toda a contenção.

O comportamento de cada uma das secções representativas é estudado através de métodos analíticos, como por exemplo através dos métodos "free-earth support" ou "fixed-earth support", ou através de programas de cálculo automático, como PLAXIS® ou PHASE2®.

Todos os elementos da estrutura de contenção são dimensionados de acordo com as normas legais em vigor, nomeadamente os Eurocódigos na União Europeia e Noruega.

Os perfis metálicos verticais são dimensionados para resistir a todos os esforços atuantes na parede desprezando-se a resistência da mistura solo-cimento, exceto para a ação sísmica em que a resistência da mistura é considerada.

A mistura solo-cimento, quando em serviço, deverá apresentar uma resistência à compressão suficiente para transmitir as pressões a que está sujeita para os perfis metálicos verticais. A transmissão dessas pressões é verificada através do efeito de arco, como apresentado na Figura 7.

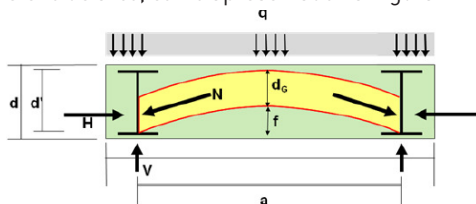


Figura 7. Distribuição da tensão horizontal na secção transversal da estrutura de contenção

Os elementos de apoio horizontal, como ancoragens ou escoras, são dimensionados do mesmo modo que para outras tecnologias de construção de paredes de contenção.

No caso de escavações abaixo do nível freático deverá ser ainda estudada a estabilidade hidráulica do fundo de escavação, nomeadamente o levantamento hidráulico e rutura por erosão interna (piping), e a estimativa do caudal de água que afluirá ao interior da escavação para o dimensionamento do sistema de bombagem.

5. 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 8, 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.

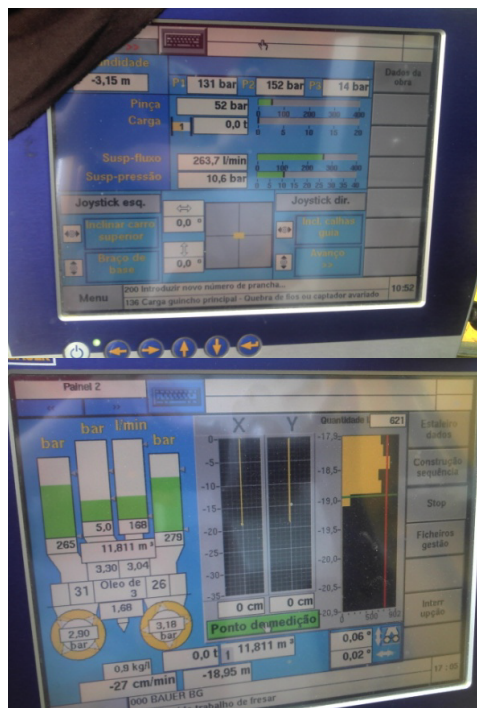


Figura 8. Painel de controlo do equipamento: Controlo da torre em cima e do Cutter em baixo (fotografias do autor)

Além do controlo efetuado pelo manobrador do equipamento durante a execução dos painéis de CSM, o controlo é realizado também 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.

Durante a escavação é efetuado o controlo através do Plano de Observação e Instrumentação, que pode incluir a colocação de alvos topográficos na estrutura de contenção e edifícios vizinhos, marcas de nível nos pavimentos dos arruamentos, inclinómetros no terreno localizado no tardo da estrutura de contenção, extensómetros instalados nas escoras metálicas ou células de cargas nas ancoragens.

6. CASOS DE OBRA

A aplicação da tecnologia Cutter Soil Mixing em estruturas de contenção já é efetuada um pouco por todo o mundo. Neste capítulo são apresentadas três obras realizadas no sul de França e uma realizada em Luanda, Angola.

6.1. Empreendimento “Villa Paradisio”

Um dos casos de obra é uma escavação realizada em Cannes para a construção de quatro pisos enterrados de o edifício de habitação coletiva “Villa Paradisio”. O recinto de escavação apresenta uma área em planta de cerca de 840 m², com uma profundidade média de escavação de 12 m, confrontando diretamente com edifícios vizinhos e arruamentos, visível na Figura 9.

Apesar de se tratar de uma escavação com 12 m de profundidade em contexto urbano, na presença de nível freático sensivelmente a meia altura da escavação, a presença do substrato rochoso dolomítico fraturado detetado acima da profundidade máxima de escavação constituiu um bom apoio da parte inferior da cortina, tendo permitido avançar com segurança para uma solução que contemplou apenas um apoio horizontal materializado por escoras metálicas. Esta solução, além de conter a escavação de face vertical, teve um segundo objetivo de limitação de afluência de água ao recinto de escavação.



Figura 9. Vista aérea da localização da obra “Villa Paradisio”

A interpretação dos resultados dos ensaios realizados *in situ* e em laboratório permitiram efetuar o seguinte zonamento geotécnico:

- Argilas e aterros argilosos detetados desde a superfície até profundidades variáveis entre 4.2 m e 9.6 m (ZG1);
- Substrato rochoso dolomítico fraturado (ZG2).

Na Figura 10 encontra-se representado o zonamento geotécnico definido e os respetivos parâmetros geomecânicos adotados.

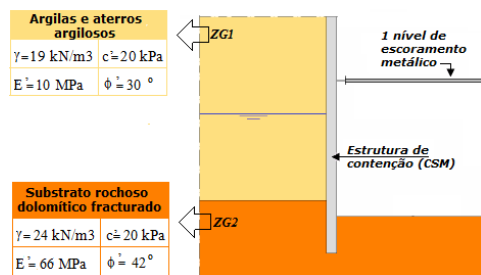


Figura 10. Principais parâmetros geomecânicos e corte-tipo da escavação

O nível freático foi detetado a sensivelmente 6 m de profundidade e verificou-se a circulação de água subterrânea sobretudo na interface entre a argila e o substrato rochoso dolomítico fraturado bem como no próprio maciço rochoso devido ao seu elevado grau de fracturação.

Neste contexto, foi proposta e concebida uma solução de contenção constituída por uma parede contínua de painéis de solo-cimento de secção transversal retangular com espessura de 0,55 m, até uma profundidade média de 15 m de forma a garantir um comprimento mínimo de encastramento de 3 m abaixo do fundo de escavação. Para responder às solicitações impostas pelo impulso de terras, pelo impulso hidrostático e pelas sobrecargas à superfície foi necessário prever a instalação de dois perfis metálicos IPE 450 (S 275 JR) em cada painel de CSM. A solidarização dos painéis e dos perfis metálicos foi garantida através da execução de uma viga de coroamento em betão armado executada no topo dos painéis. Definiu-se um nível

de travamento horizontal para os cerca de 12 m de altura de escavação total, materializado por escoras metálicas tubulares (Figura 11), associadas a vigas de distribuição metálicas executadas ao longo do perímetro da obra.

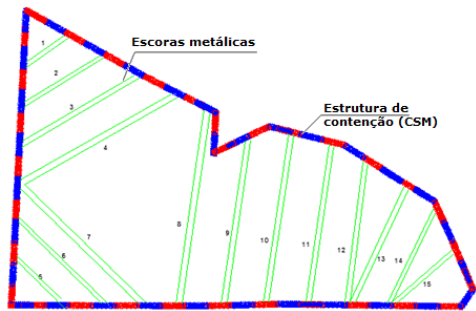


Figura 11. Representação em planta da solução de contenção adotada na obra “Villa Paradisio”

À medida que a escavação foi avançando, executou-se simultaneamente uma parede em betão projetado com 0,15 m de espessura para recobrimento da parede de CSM.

A análise numérica efetuada na fase de dimensionamento da estrutura de suporte foi realizada pelo método dos elementos finitos, através do programa de cálculo Plaxis®. Para a modelação do terreno em profundidade foram considerados os parâmetros geomecânicos estimados com base nos estudos geotécnicos realizados, tendo-se recorrido ao modelo de comportamento *Mohr-Coulomb*.

Para a modelação numérica foram seleccionadas as secções mais representativas da obra, tendo-se procedido, pelo lado da segurança, à modelação das secções mais desfavoráveis e, por outro lado, à modelação de outras secções menos desfavoráveis para evitar o sobredimensionamento.

Na análise das diferentes secções procedeu-se à limitação dos deslocamentos horizontais da estrutura e dos assentamentos do terreno à superfície a valores compatíveis com as exigências ao nível das implicações na envolvente da obra.

Dadas as características da zona de intervenção e a respetiva envolvente, foram definidos

os seguintes limites para os deslocamentos horizontais máximos aceitáveis: 15 mm no topo da cortina e 25 mm ao longo da altura da cortina. No Quadro 1 são apresentados os valores dos deslocamentos horizontais máximos da cortina obtidos na análise numérica.

	Deslocamento horizontal (mm)
No topo da cortina	10.3
Ao longo da altura da cortina	21.2

Quadro 1. Deslocamentos horizontais máximos da cortina obtidos na análise numérica

Na modelação numérica das secções estudadas foram previstos valores inferiores aos valores definidos como máximos aceitáveis, tendo-se verificado durante a execução da obra que os valores de deslocamentos horizontais obtidos foram ainda ligeiramente inferiores aos valores previstos na modelação numérica.

No dimensionamento efetuado considerou-se, para cargas de serviço, uma resistência à compressão do solo-cimento de 2,0 MPa e um módulo de deformabilidade de 1 GPa, tendo sido estes parâmetros submetidos a validação através da realização de ensaios laboratoriais sobre amostras recolhidas dos painéis de CSM da obra. Relativamente à resistência à compressão do solo-cimento, exigiu-se um fator de segurança de 2, pelo que, apenas se aceitaram como válidos valores de resistência à compressão uniaxial iguais ou superiores a 4,0 MPa.

6.2. Edifício “May Flower”

O edifício “May Flower”, localizado em Antibes, França, é constituído por rés-do-chão e sete pisos elevados e quatro pisos subterrâneos (Figura 12) numa área de 317 m² e encontra-se delimitado por arruamentos e edifícios existentes. A estrutura de contenção foi concebida para permitir as escavações necessárias à execução dos pisos subterrâneos do novo edifício.



Figura 12. Enquadramento da obra May Flower

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.

A solução proposta e concebida consistiu numa cortina contínua de painéis CSM, travada provisoriamente por quatro níveis de escoramento metálico, sendo os três níveis inferiores pré-esforçados. Os painéis de solo-cimento foram executados com secção transversal retangular de dimensões 2,40m x 0,55m.

A limitação da afluência de água ao interior da escavação foi uma das preocupações do projeto, tendo para tal sido definido um comprimento mínimo de encastramento de 6 m a partir do fundo de escavação e os painéis foram executados com um comprimento médio de 17 m.

Para acomodar a totalidade dos impulsos do terreno, das sobrecargas de utilização das áreas localizadas a tardo da contenção e o impulso hidrostático, cada painel foi armado verticalmente com dois perfis do tipo IPE 450 (S 275 JR).

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

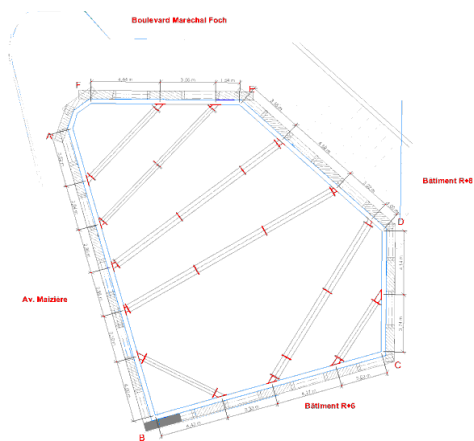


Figura 13. Planta da estrutura da contenção e escoramento horizontal da obra May Flower

A análise da estrutura de contenção foi realizada recorrendo a um modelo numérico, através do programa de cálculo Plaxis®. A análise realizada englobou o estudo de seis secções representativas. 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).

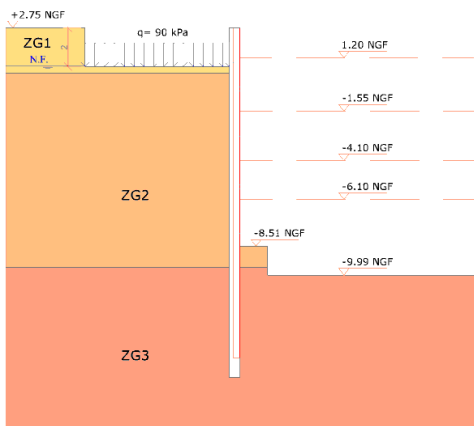


Figura 14. Secção 5: Corte-tipo

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

	Deslocamento horizontal (mm)
Topo	5.0
Máximo	39.7

Quadro 1. Deslocamentos horizontais máximos da cortina, análise numérica da secção 5

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 à rotura hidráulica por erosão interna.

Após a execução da cortina periférica em solo-cimento, iniciou-se a escavação faseada com a colocação dos vários níveis de escoramento nas cotas previstas. A Figura 15 mostra uma fotografia da situação imediatamente antes da colocação do segundo nível de escoramento.

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”, visível na Figura 16.



Figura 15. Fotografia da obra antes da aplicação do segundo nível de escoramento (Geo-Rumo)



Figura 16. Fotografia do sistema de aplicação de pré-esforço (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.

O controlo da qualidade, de acordo com o descrito anteriormente, permitiu verificar a resistência à compressão ao longo do tempo. No Quadro 2 encontram-se resumidos os valores mínimos obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples realizados sobre provetes

recolhidos dos painéis da estrutura de contenção. 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, de 4 MPa, o que permite concluir que os pressupostos considerados no dimensionamento se encontram do lado da segurança.

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

Quadro 2. Valores mínimos obtidos nos ensaios de resistência à compressão simples

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 exibiram deslocamentos. As deformações máximas em cada fase 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.

6.3. “Parking Saint Nicolas”

O “Parking Saint Nicolas” é um parque de estacionamento subterrâneo construído na cidade de Cannes, em França, com capacidade para 420 lugares de estacionamento, e desenvolve-se em quatro pisos subterrâneos, a que correspondeu uma altura média de escavação de 14 m. O recinto de escavação confronta diretamente com edifícios e arruamentos existentes e dispõe uma geometria em planta aproximadamente retangular com uma área de aproximadamente 2700 m².

O parque encontra-se numa zona urbana e confronta diretamente com arruamentos e edi-

fícios vizinhos, pelo que houve a necessidade de efetuar um acompanhamento rigoroso do comportamento da estrutura de contenção e das estruturas vizinhas ao longo das diferentes fases de escavação, de modo a garantir a minimização de interferências na envolvente da obra.



Figura 17. Vista aérea da localização do “Parking Saint Nicolas”

A análise dos resultados obtidos nos estudos geotécnicos realizados permitiu colocar em evidência um contexto geológico heterogéneo, tendo-se identificado a presença de uma camada de argilas arenosas com passagens margosas até profundidades variáveis entre 5 m e 10 m, sobrejacentes ao substrato constituído por margas argilosas e calcários com algumas passagens mais alteradas. Tendo presente a heterogeneidade dos terrenos encontrados, os parâmetros geomecânicos que serviram de base ao estudo da solução de contenção foram agrupados de acordo com a informação presente no Quadro 3.

	Argilas arenosas (montante)	Argilas arenosas (jusante)	Margas alteradas	Margas rijas
γ [kN/m³]	19	19	19	22
c' [kPa]	10	10	25	70
φ' [°]	25	25	25	30
E_s [MPa]	15	6	6	225
k_h [m/s]	1×10^{-4}	1×10^{-4}	$2,5 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-6}$
k_v [m/s]	5×10^{-5}	5×10^{-5}	$2,5 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-6}$

Quadro 3. Principais parâmetros geomecânicos adotados

Realizou-se ainda um estudo hidrológico que conduziu aos valores do coeficiente de permeabilidade que constam também no Quadro 3. O nível freático foi detetado a sensivelmente 5 m de profundidade. Ainda no âmbito do estudo hidrológico procedeu-se à aferição do comprimento mínimo de encastramento dos painéis da estrutura de contenção que permitiria minimizar a afluência de água ao interior do recinto de escavação. Nesse contexto, definiu-se que a estrutura de contenção deveria ter um comprimento mínimo de encastramento de 4 m no interior do substrato competente (Margas rijas).

A estrutura de contenção necessária para a realização dos pisos subterrâneos do parque de estacionamento consistiu numa cortina contínua de painéis de CSM com secção transversal retangular de dimensões 2,40x0,60 m. Tendo por base os esforços resultantes do impulso hidrostático, do impulso do terreno e das sobrecargas à superfície, cada painel CSM foi armado com dois perfis verticais do tipo IPE 450 em aço S 275 JR, posicionados com um espaçamento entre si de 1,10 m. Os painéis de CSM e os respetivos perfis verticais foram solidarizados no topo por meio de uma viga de coroamento em betão armado.

O travamento da parede de CSM foi materializado por dois níveis de bandas de laje executadas de forma compatibilizada com os trabalhos de escavação e posteriormente incorporadas na estrutura dos pisos, constituindo quadros de travamento rígidos dos quatro alçados. Os referidos travamentos foram executados ao nível das lajes dos pisos “0” e “-2”. Nas zonas de pequenas aberturas da laje e nas zonas das caixas de escadas, recorreu-se a escoramentos metálicos localizados. O apoio provisório das bandas de laje foi garantido por meio de 28 microestacas de fundação provisórias. Previu-se ainda a execução de uma parede de revestimento em betão armado com 0,20 m de espessura, realizada à medida que a escavação foi avançando.

É de referir que, na situação particular desta obra, caso se optasse pelo travamento da pare-

de de contenção por meio de escoramentos metálicos, as dimensões do recinto de escavação obrigariam à utilização de escoras de elevado comprimento e diâmetro e, dada a existência de confrontações diretas de edifícios, a utilização de ancoragens não seria viável. Por estas razões, a utilização de bandas de laje como meio de travamento da parede de contenção foi a opção considerada técnica e economicamente mais vantajosa, tendo como vantagem principal a incorporação de elementos da estrutura definitiva para o travamento em fase provisória.

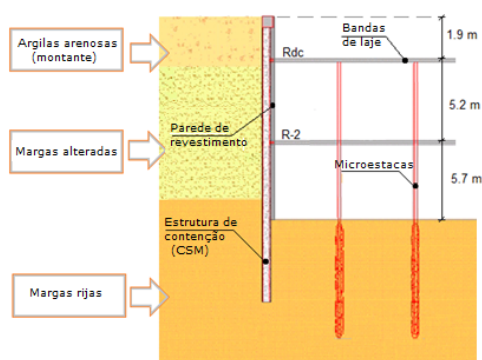


Figura 18. Corte-tipo da estrutura de contenção

A Figura 18 mostra um corte-tipo da solução implementada e a Figura 19 apresenta uma vista em planta da configuração geral da estrutura de contenção periférica, constituída por 95 painéis de CSM e a identificação de duas das quatro secções analisadas.

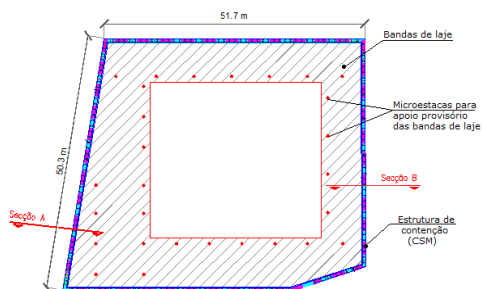


Figura 19. Planta da obra

O comportamento das secções estudadas foi analisado recorrendo ao programa de elementos

finitos Plaxis®. Através do referido programa de cálculo foram modeladas todas as fases do processo construtivo, de forma a maximizar a aproximação entre a modelação numérica e a situação real, tendo-se procedido ao estudo do comportamento do maciço e da própria estrutura de contenção em termos de esforços e de deformações.

Nas figuras 4 e 5 são apresentados os modelos de análise de duas das secções estudadas: Secção A, representativa do alçado oeste e Secção B, representativa do alçado este.

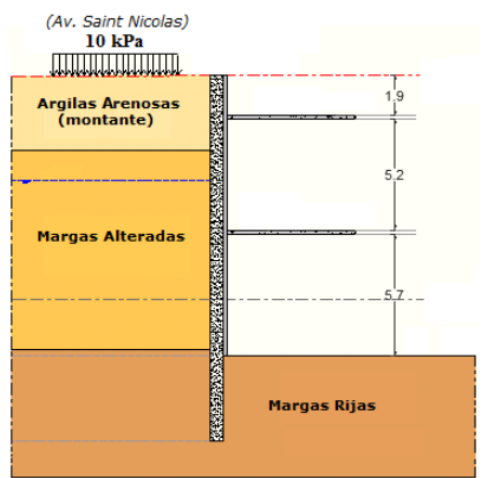


Figura 20. Corte tipo da Secção A

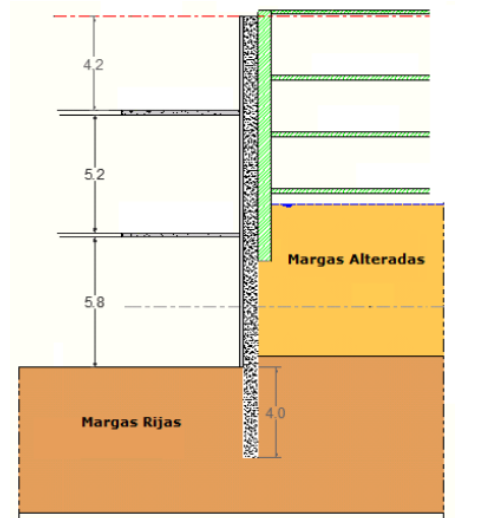


Figura 21. Corte tipo da Secção B

No Quadro 4 são apresentados os valores dos deslocamentos horizontais máximos da cortina obtidos na análise numérica das duas secções referidas.

	Deslocamento horizontal máximo (mm)	
	Secção A	Secção B
No topo da cortina	-8,0	0,2
Ao longo da altura da cortina	15,0	5,0

Quadro 4. Deslocamentos horizontais máximos da cortina obtidos nas análises numéricas: Secções A e B

No que respeita ao dimensionamento do travamento da estrutura de contenção, foi necessário ter em conta a interação entre a estrutura de contenção e as bandas de laje que constituiriam o travamento. Para tal, foram introduzidos apoios elásticos no modelo de análise bidimensional da contenção periférica, com a rigidez adequada para simular o efeito de quadro fechado materializado pelas bandas de laje. As forças obtidas ao nível dos referidos apoios elásticos foram posteriormente utilizadas no modelo de cálculo das bandas de laje, o que permitiu obter os esforços de dimensionamento das bandas de laje e a definição da armadura adicional necessária para o seu correto funcionamento em fase provisória.

O controlo de qualidade na obra foi realizado a vários níveis. Numa primeira fase, durante a execução dos painéis de CSM, através do controlo dos parâmetros de execução efetuado em tempo real pelo manobrador do equipamento e numa segunda fase, através de ensaios laboratoriais de provetes recolhidos dos painéis da estrutura de contenção. Paralelamente efetuou-se a observação da obra ao longo da execução da escavação, tendo-se realizado leituras dos aparelhos de monitorização instalados de acordo com o Plano de Observação e Instrumentação previsto.

Os resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão uniaxial realizados sobre provetes recolhidos dos painéis da estrutura de contenção encontram-se resumidos no Quadro 3.

Série de ensaios	Resistência à compressão uniaxial (MPa)			
	3 dias	7 dias	14 dias	28 dias
Série I	4.4	6.5	8.4	-
Série II	-	2.5	4.5	8.0
Série III	-	2.5	4.5	-
Série IV	-	2.5	6.0	-

Quadro 5. Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão uniaxial

A resistência à compressão uniaxial dos provetes ensaiados a partir dos 14 dias foi, em todas as séries de ensaios, superior à resistência exigida em projeto (4 MPa) o que permitiu validar os pressupostos considerados.

Para proceder à verificação dos pressupostos de projeto no que respeita às microestacas de apoio provisório das bandas de laje, foram realizados, conforme referido, ensaios de arranque em microestacas executadas para o efeito. Os resultados dos ensaios de arranque indicaram um comportamento satisfatório destes elementos, tendo-se prosseguido posteriormente com maior segurança para a execução da obra.

A Figura 22 mostra a localização dos aparelhos de monitorização implementados no âmbito do Plano de Instrumentação e Observação.

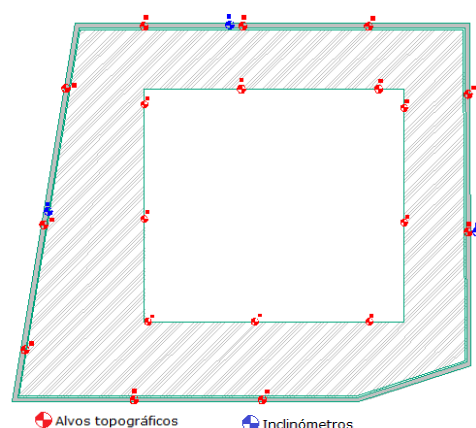


Figura 22. Distribuição dos alvos topográficos e dos inclinómetros instalados

Foram instalados 3 inclinómetros no tardo da estrutura de contenção e 19 alvos topográficos na estrutura de contenção e no primeiro nível de bandas de laje. Na generalidade, os resultados obtidos por via da instrumentação corresponderam aos valores previstos através das modelações numéricas efetuadas. Como seria de esperar, na direção paralela à estrutura de contenção não se verificou praticamente a ocorrência de deslocamentos horizontais e, na direção perpendicular à estrutura de contenção, ocorreram deslocamentos horizontais com algum significado, ainda que inferiores aos valores definidos como critérios de alerta e próximos dos valores esperados.

6.4. Parque de estacionamento “Largo do Ambiente”

O “Parque de Estacionamento do Largo do Ambiente” é um parque de estacionamento subterrâneo construído na cidade de Luanda, em Angola. O parque, com capacidade para 525 lugares de estacionamento, desenvolve-se em dois a cinco pisos subterrâneos, correspondendo a uma altura de escavação variável de 8,0 a 17,4 m. O recinto de escavação confronta diretamente com edifícios e arruamentos existentes e dispõe uma geometria em planta retangular com uma área de aproximadamente 4.735 m² (Figura 23).

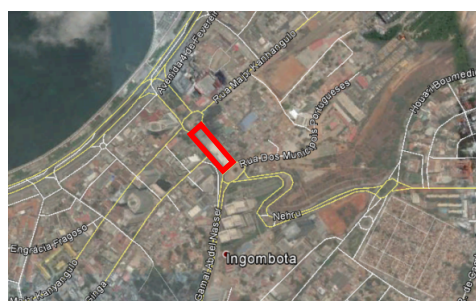


Figura 23. Vista aérea da localização da obra

De acordo com o disposto neste estudo, os terrenos ocorrentes na área de intervenção apresentam os seguintes materiais:

- Terrenos do Holocénico de génese antrópica e/ou aterros, areias de praia de duna. **Solos arenosos de granulometria variável**, cor castanho claro a escuro. Os valores de SPT variam entre 1 e 31 pancadas;
- Formação Pliocénica, constituída por **areias heterogêneas por vezes com silte**. Estes solos encontram-se subjacentes aos anteriores, com valores SPT entre 0 e 60 pancadas.

De acordo com a informação disponível no momento da elaboração do Projeto de Execução, previu-se que durante os trabalhos de escavação a interceção do nível freático se efetuasse à profundidade de cerca de 12,0m, na zona mais elevada do terreno e a 3,50m na zona mais baixa, pelo que, a parede de CSM teria uma segunda função de impermeabilização relativamente à água existente na sua face tardoz.

Com base nos ensaios de bombagem e de recuperação (Método de Cooper-Jacob e de Theis) realizados no local, estimou-se que os coeficientes de permeabilidade dos solos ocorrentes deveriam variar de média a alta, encontrando-se no intervalo de valores compreendido entre $1,5 \times 10^{-3}$ e $4,5 \times 10^{-4}$ m/s.

A estrutura de suporte foi realizada ao abrigo painéis contínuos de solo-cimento com espessura de 60 cm, reforçados com dois perfis verticais do tipo IPE 400 a IPE 270, dependendo da altura de escavação, em aço S 275 JR.

De forma a controlar a afluência de água ao interior do recinto de escavação e a garantir a segurança da mesma em termos de estabilidade hidráulica e de estabilidade global, propôs-se um comprimento total da cortina de 30,0m na parte mais alta e 20,0m na mais baixa.

Os painéis de CSM e os respetivos perfis verticais foram solidarizados no topo por meio de uma viga de coroamento em betão armado.

O travamento da parede de CSM foi materializado por dois a cinco níveis de bandas de laje executadas de forma compatibilizada com os trabalhos de escavação e posteriormente incorporadas na estrutura dos pisos, constituindo

quadros de travamento rígidos dos quatro alçados. Nas zonas de pequenas aberturas da laje e nas zonas das caixas de escadas, recorreu-se a escoramentos metálicos localizados. O apoio provisório das bandas de laje foi garantido por meio estacas de fundação de 800mm de diâmetro.

Atingida a cota do fundo de escavação, a estrutura em betão armado é construído de forma ascendente, sendo no final demolidos os troços das estacas que serviram de apoio entre as lajes.

O comportamento das secções estudadas foi analisado recorrendo ao programa de elementos finitos Plaxis®, tendo-se recorrido ao modelo de comportamento *Hardenig Soil*.

O estudo do travamento da parede de contenção foi efetuado tendo em conta a interação entre a cortina em CSM e as bandas de laje que constituem o travamento. Neste sentido, foram introduzidos apoios elásticos no modelo de análise da contenção periférica, a rigidez dos quais pretende simular a rigidez do quadro fechado constituído pelos troços de laje de travamento.

A rigidez introduzida no modelo de elementos finitos da contenção periférica foi determinada por via da análise do modelo do quadro fechado. Na Figura 24 pode ver-se o modelo utilizado, tendo-se aplicado ao mesmo, para determinação da rigidez do mesmo, uma carga distribuída de 1000kN/m.

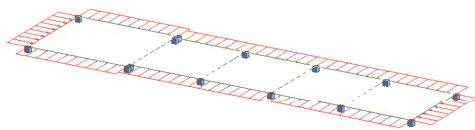


Figura 24. Avaliação da rigidez das bandas de laje

A avaliação da deformação do modelo para a referida carga, resultou numa deformação a meio vão dos troços de laje de 0,010m (deformação máxima), permitindo a determinação da rigidez mínima do sistema estrutural de travamento:

$$K = (1000 \text{ kN/m}) / 0,010 \text{ m} \approx 1 \times 10^5 \text{ kN/m/m}$$

Esta rigidez foi atribuída aos apoios elásticos do modelo da contenção, que pretendem

simular os troços de laje, reproduzindo desta forma a rigidez dos quadros fechados formados por estes.

Como referido, estimou-se que os coeficientes de permeabilidade dos solos ocorrentes deveriam variar entre $1,5 \times 10^{-3}$ e $4,5 \times 10^{-4}$ m/s.

Procedeu-se ao estudo do caudal que afluiria ao interior da escavação. Os cálculos foram efetuados com o programa PHASE2 desenvolvido pela Rocscience Inc. Este programa baseia-se no Método dos Elementos Finitos (MEF) e está adaptado para o estudo de problemas de percolação em maciços terrosos.

Na Figura 25 apresenta-se a rede de percolação e assinala-se o caudal a bombear para garantir o regime permanente, por metro de desenvolvimento do edifício para a situação com coeficiente de permeabilidade de $1,5 \times 10^{-3}$ m/s.

O caudal a bombear será de 19,4 m³/h/m. Como o edifício tem uma extensão de cerca de 140 m, estimou-se que o caudal que surgiria no interior da escavação seria 2.716 m³/h.

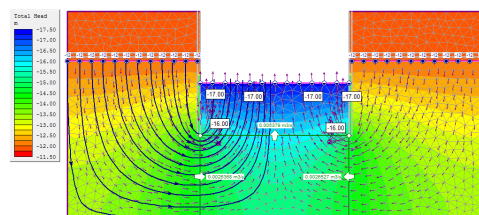


Figura 25. Situação $k_s = 1,5 \times 10^{-3}$ m/s

Na análise da percolação foi também avaliado o fenómeno de rotura hidráulica por erosão interna, também conhecido como “piping”, este fenómeno de rotura está associado a elevados gradientes hidráulicos junto a base da escavação.

Continuando a análise para a secção representativa 1 e tendo em conta que para as areias saturadas médias/grossas o peso volúmico varia entre 18 e 22 kN/m³, pode concluir-se que i_{CR} oscilará entre 0,8 e 1,2, pelo que considerou-se um valor intermédio de 1,0.

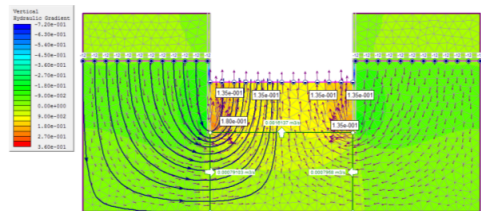


Figura 26. Gradiente hidráulico vertical - situação $k_s = 1,5 \times 10^{-3}$ m/s

A partir do programa de cálculo obteve-se o valor do gradiente hidráulico máximo de jusante de 0,18, apresentado na Figura 26, e consequentemente um FS de 5,6.

Durante a execução dos trabalhos, devido à grande possança das areias, foram encontradas algumas dificuldades na estabilização destas durante a execução dos painéis, tendo o Cutter ficado preso nas areias duas vezes. Em ambas as situações, com dificuldade, o Cutter foi recuperado, sendo que em um dos casos, o Cutter esteve preso cerca de um mês.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da tecnologia de CSM nos casos de obra apresentados permitiu responder aos objetivos pretendidos, tendo sido possível, com o cenário geológico e hidrogeológico existente, a execução da escavação com as alturas pretendidas, sem por em causa a estabilidade das estruturas vizinhas.

No que respeita às vantagens de aplicação da tecnologia de CSM relativamente a tecnologias tradicionais, deve sublinhar-se a possibilidade de conhecimento da geometria exata dos painéis de solo-cimento e dos desvios ocorridos em profundidade, bem como a versatilidade do equipamento utilizado. Nestes casos, as vantagens referidas assumiram particular relevância dado que, por um lado, o conhecimento da geometria exata dos painéis e dos desvios ocorridos em profundidade permitiu obter uma ligação eficaz entre painéis e a redução da afluência de água ao recinto de escavação e, por outro lado, a versatilidade do equipamento permitiu atravessar os diferentes materiais que compõe o subsolo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Geo-Rumo, Tecnologia de Fundações, S.A. as fotografias cedidas e a autorização para inclusão das suas obras no presente artigo.

BIBLIOGRAFIA

- Arnold, M., Beckhaus, K. and Wiedenmann, U. (2011). Cut-off wall construction using Cutter Soil Mixing: a case study. *Geotechnik*, volume 34: pages 11-21.
- Bringiotti, M., Dossi, M., Nicastro D. (2009). Miscelazione profonda dei terreni: metodi classici e tecnologie innovative – CSM by BAUER. *Geofluid* 2009.
- 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.
- Gomes, P. (2009). Cortinas Escoradas para suporte de escavações – O pré-esforço do escoramento por via do subfaseamento da escavação. *Tese de Mestrado, FEUP*, Porto.
- Gomes, P., Peixoto, A. e Borges, R. (2016). Estrutura de contenção periférica executada com a tecnologia de cutter soil mixing no edifício “May Flower” em Antibes - França, *15 CNG: A Geotecnia e os Desafios Societais. 15 CNG Congresso Nacional de Geotecnia*, 2016, Porto.
- 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.
- Matos Fernandes, M., Peixoto, A., Pinto, A., Pita, X., Topa Gomes, A. e Gomes Pedro, A. (2010). Cutter Soil Mixing aplicada a escavações urbanas. *COBRAMSEG 2010: Engenharia Geotécnica para o desenvolvimento, inovação e sustentabilidade. COBRAMSEG 2010 - Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica*, 2010, Gramado, Brasil.
- Peixoto, A., Sousa, E. e Gomes, P. (2012). Estrutura de contenção periférica executada com a tecnologia de cutter soil mixing com travamento através de elementos estruturais, *13 CNG: Pensar e Construir com a Natureza. 13 CNG Congresso Nacional de Geotecnia*, 2012, Lisboa.
- Peixoto, A., Sousa, E. e Gomes, P. (2012). Estrutura de contenção executada com a tecnologia de cutter soil mixing no empreendimento “Villa Paradisio” em Cannes - França, *13 CNG: Pensar e Construir com a Natureza. 13 CNG Congresso Nacional de Geotecnia*, 2012, Lisboa.
- Peixoto, A., Gomes, P. e Baptista, Marco (2016). Estrutura de contenção periférica executada com a tecnologia de cutter soil mixing no “Parque de Estacionamento do Largo do Ambiente” em Luanda – Angola, *15 CNG: A Geotecnia e os Desafios Societais. 15 CNG Congresso Nacional de Geotecnia*, 2016, Porto.
- Sousa, E. (2009). A técnica de Cutter Soil Mixing aplicada a escavações urbanas – Aspetos gerais e caso de estudo. *Tese de Mestrado, FEUP*, Porto.
- Stoetzer, E., Brunner, W., R., Gerressen, F.W. and Schoepf, M. (2006). CSM Cutter Soil Mixing – A New Technique for the Construction of Subterranean Walls Initial Experiences Gained on Completed. *In: Proceedings DFI/EFEC 10th International Conference on Piling and Deep Foundations*, Amsterdam.