

ESTRUTURA DE CONTENÇÃO EXECUTADA COM A TECNOLOGIA DE CUTTER SOIL MIXING NO EMPREENDIMENTO "VILLA PARADISIO" EM CANNES - FRANÇA

EARTH RETAINING STRUCTURE USING CUTTER SOIL MIXING TECHNOLOGY FOR THE "VILLA PARADISIO" PROJECT 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

No presente artigo é descrita a solução de contenção periférica adoptada no âmbito da construção dos pisos subterrâneos do edifício "Villa Paradisio" localizado em Cannes, França, referindo-se os aspectos mais relevantes ao nível da concepção e da execução da obra. O cenário geológico e geotécnico no local da obra caracteriza-se pela presença de aterros argilosos e argilas de espessura variável, sobrejacentes ao substrato dolomítico rochoso fracturado nas profundidades investigadas. De acordo com os principais condicionalismos, designadamente de ordem geológica e geotécnica e relativos a condições de vizinhança, preconizou-se a execução de uma estrutura de contenção periférica constituída por painéis de solo-cimento realizados através da tecnologia de *Cutter Soil Mixing* (CSM), reforçados com perfis metálicos verticais, associada a um nível de escoramento. Como aspectos particulares desta obra destaca-se a altura máxima de escavação de cerca de 12 m com apenas um nível de travamento, associada às características geomecânicas das formações sobrejacentes ao substrato rochoso e à localização do nível de água sensivelmente a meia altura da escavação. Neste artigo são apresentados e analisados os principais resultados da modelação, instrumentação, observação e controlo de qualidade da obra.

ABSTRACT

This paper presents the most relevant design and execution aspects of a retaining wall for the construction of the underground floors of "Villa Paradisio" residential building, at Cannes, France. The geology at the site is characterized by the presence of a clayey fill overlying a fractured dolomitic substrate for the analysed depths. Taking into account the existing constraints, mainly the geological and geotechnical conditions and the urban area conditions, the adopted solution was a retaining wall executed by soil-cement panels, through the application of Cutter Soil Mixing (CSM) technology. The retaining wall was reinforced with vertical steel piles and temporarily supported by one level of horizontal steel pipe struts. The particularities of this work are the maximum depth of excavation, which is about 12 m, with a single level of struts, in addition to the geotechnical characteristics of the formations overlying the bedrock and the location of the water level, nearby halfway up the excavation. The main aspects of execution process, the numerical modelling and the quality control of the work are also presented in this paper.

1 - INTRODUÇÃO

No presente artigo é abordado o caso de obra da estrutura de suporte das escavações necessárias para a execução dos pisos subterrâneos do edifício de habitação "Villa Paradisio", localizado em Cannes, França. O edifício desenvolve-se em quatro pisos subterrâneos destinados a estacionamento e sete pisos elevados ao longo dos quais se distribuirão os oitenta e um apartamentos previstos (Figura 1). O recinto de escavação apresenta uma área em planta de cerca de 840 m², com uma profundidade média de escavação de 12 m.

O novo edifício de habitação localiza-se numa zona densamente edificada, confrontando directamente com arruamentos e edifícios vizinhos (Figura 2). Ao longo do alçado norte da obra, verifica-se a existência de um canal enterrado em betão armado, tendo sido necessário garantir a sua integridade durante a execução dos trabalhos. Em contextos urbanos, como é o caso do local onde se insere esta obra, impõe-se que uma das principais preocupações seja, além de garantir as condições de segurança da obra, minimizar as interferências sobre estruturas e infra-estruturas vizinhas e garantir o seu funcionamento em condições de segurança durante e após a execução dos trabalhos.



Figura 1 – Representação de uma vista exterior do edifício

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 fracturado detectado 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. A estrutura de contenção consistiu numa cortina contínua realizada com a tecnologia de *Cutter Soil Mixing* (CSM), com apenas um nível de apoio, conforme referido, o que constituiu uma das principais particularidades deste projecto. Esta solução, além de conter a escavação de face vertical, teve um segundo objectivo de limitação de afluência de água ao recinto de escavação.

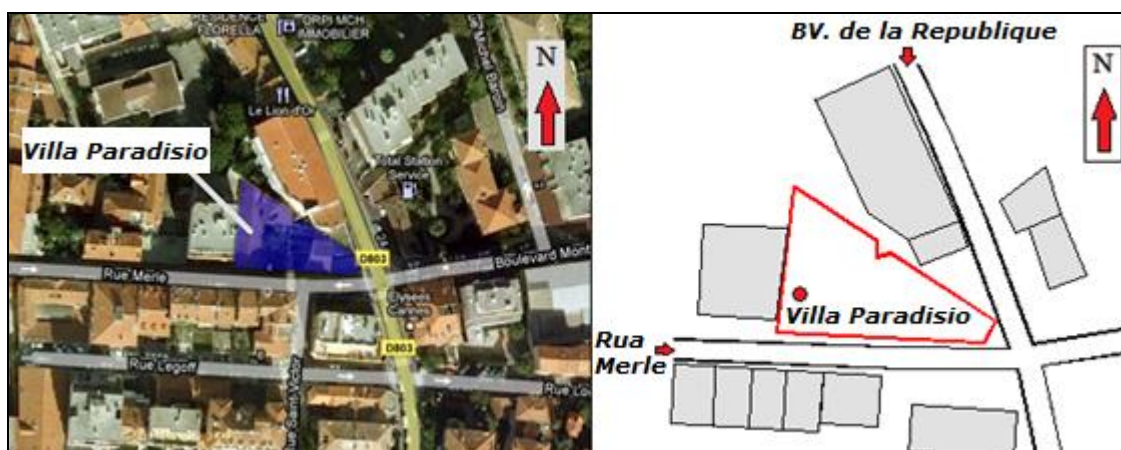


Figura 2 – Vista aérea da localização da obra

2 - PRINCIPAIS CONDICIONAMENTOS

2.1 - Geologia e Geotecnia

A caracterização geológica e geotécnica dos terrenos interessados pela obra foi efectuada, numa primeira fase, através de uma campanha de prospecção que incluiu a realização de uma sondagem executada até aos 15 m de profundidade e a recolha de quatro amostras intactas de solo posteriormente submetidas a ensaios laboratoriais. Nesta primeira fase, o objectivo centrou-se essencialmente em avaliar a natureza dos horizontes geotécnicos envolvidos. Identificou-se uma camada superficial de argilas e aterros argilosos, sobreposta ao substrato rochoso dolomítico muito fracturado no topo da camada e sucessivamente menos fracturado em profundidade.

Com vista a especificar as interfaces de horizontes geotécnicos identificados, a cota do nível freático e as características geomecânicas dos terrenos, realizou-se numa segunda fase um estudo geotécnico que incluiu a realização de duas sondagens com recolha de amostras para ensaios laboratoriais, três ensaios pressiométricos (PMT – *Pressiometer Ménard Test*) e a instalação de dois piezómetros.

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

- Argilas e aterros argilosos detectados desde a superfície até profundidades variáveis entre 4.2 m e 9.6 m (Zona Geotécnica 1 – ZG1);
- Substrato rochoso dolomítico fracturado (Zona Geotécnica 2 – ZG2).

Na Figura 3 encontra-se representado o zonamento geotécnico definido e os respectivos parâmetros geomecânicos adoptados.

O nível freático foi detectado a sensivelmente 6.0 m de profundidade. Verificou-se a circulação de água subterrânea sobretudo na interface entre a camada de argila e o substrato rochoso dolomítico fracturado bem como no próprio substrato rochoso devido ao seu elevado grau de fracturação.

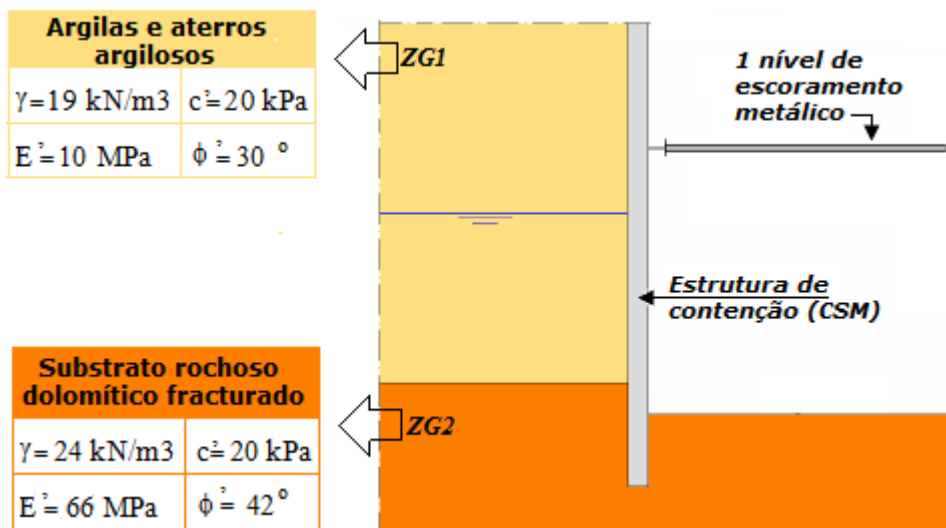


Figura 3 – Principais parâmetros geomecânicos e corte-tipo da escavação

2.2 - Condicionamentos de vizinhança

Na definição da solução de contenção dos terrenos a escavar houve a necessidade de efectuar uma avaliação cautelosa da envolvente a obra de forma privilegiar a minimização do impacto sobre as estruturas e infraestruturas vizinhas, assegurando o seu funcionamento em condições de segurança no decurso dos trabalhos. A obra, localizada numa zona urbana, apresenta as seguintes confrontações directas:

- a norte: edifício com três pisos subterrâneos e sete pisos elevados;
- a sul: arruamento (*Rua Merle*);
- a oeste: edifício com três pisos subterrâneos e cinco pisos elevados;
- a este: arruamento (*Bv. de la République*).

A figura seguinte mostra os dois edifícios que confrontam directamente com o recinto de escavação.



Figura 4 – Edifícios que confrontam directamente com o recinto de escavação no alçado oeste (à esquerda) e no alçado norte (à direita)

Ao longo do alçado norte da obra encontra-se um canal enterrado em betão armado, como ilustra a Figura 5, tendo sido necessário atender à preservação da sua integridade durante a execução dos trabalhos.

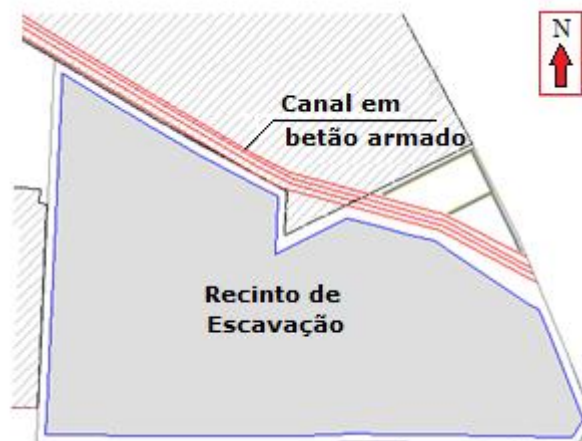


Figura 5 – Canal enterrado em betão armado localizado ao longo de um dos alçados da obra

3 - DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO ADOPTADA

Na definição da solução adoptada para a estrutura de contenção, uma das principais preocupações foi a procura de uma tecnologia que permitisse obter uma solução capaz de responder aos objectivos pretendidos, tendo em conta a envolvente densamente edificada da obra e a natureza essencialmente argilosa do terreno nos primeiros metros de profundidade, sobrejacente ao substrato dolomítico rochoso fracturado. Neste contexto, foi proposta e concebida uma solução de contenção constituída por uma parede contínua de painéis de solo-cimento de secção transversal rectangular com espessura de 0.55 m, executados com a tecnologia de CSM 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 (em aço S 275 JR) em cada painel de CSM da estrutura de contenção. 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 6), associadas a vigas de distribuição metálicas executadas ao longo do perímetro da obra.

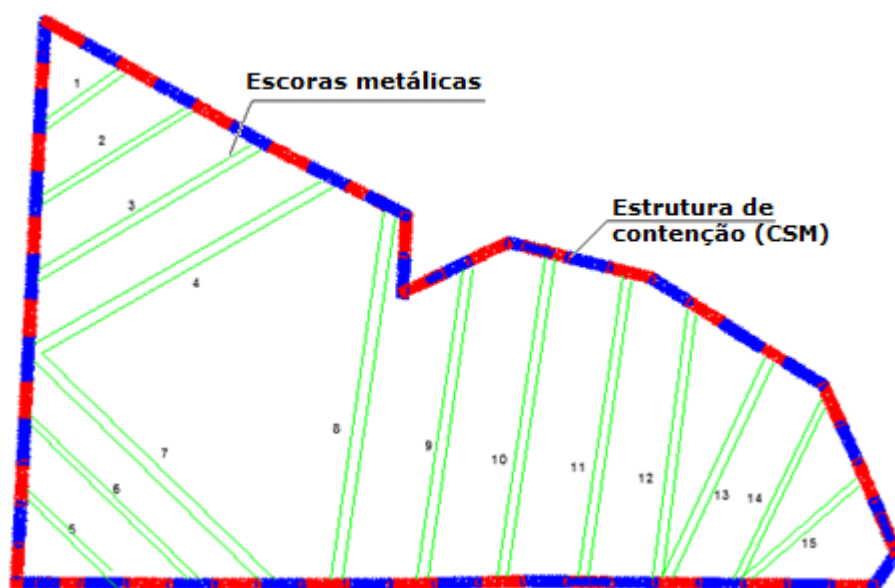


Figura 6 – Representação em planta da solução de contenção adoptada

Preconizou-se um comprimento de sobreposição entre painéis de CSM adjacentes de 0.20 m de forma a garantir uma ligação eficaz, acautelando eventuais desvios do equipamento em profundidade.

À medida que a escavação foi avançando, executou-se simultaneamente uma parede em betão projectado com 0.15 m de espessura para recobrimento da parede de CSM.

A execução dos painéis de CSM até, no mínimo, três metros abaixo do fundo de escavação (Figura 7) permitiu diminuir a afluência de água ao recinto de escavação. No entanto, para garantir as condições necessárias de circulação dos equipamentos devido à afluência de água através do fundo de escavação foi prevista a realização de poços de bombagem.

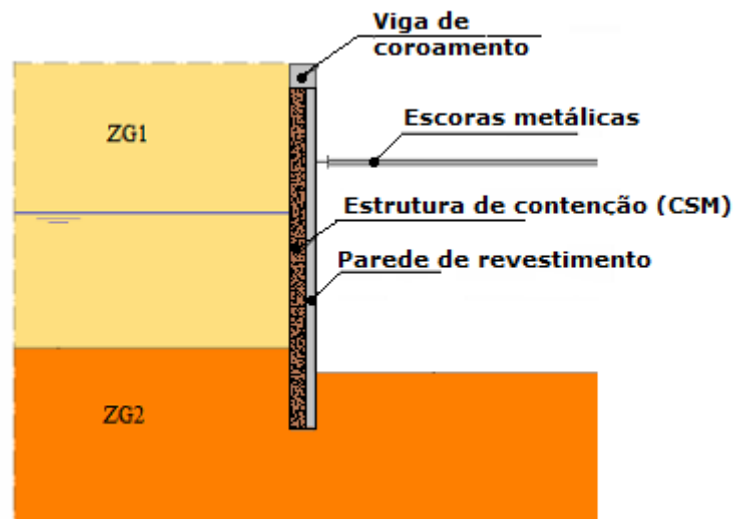


Figura 7 – Corte-tipo da estrutura de contenção

Na figura seguinte pode observar-se o aspecto parcial da obra durante a sua execução, onde é possível visualizar algumas escoras de canto, as respectivas vigas de distribuição metálicas e a parede de revestimento.



Figura 8 – Aspecto parcial da estrutura de contenção após a execução das vigas de distribuição metálicas, das escoras metálicas e da parede em betão projectado

Efectuando uma descrição da tecnologia de CSM, pode referir-se que esta tecnologia 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 9. 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 rectangular, 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 9 – Equipamento de CSM com rotação em torno de eixos horizontais e vista de um painel de CSM (à esquerda) e ferramenta de execução de DSM com rotação em torno de um eixo vertical (à direita)

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

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 projecto de forma a obter uma parede contínua de CSM. O facto de esta tecnologia permitir a utilização do solo *in situ* como material de construção, evitando grandes volumes de material a vazadouro, 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 exacta 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 correcção do seu posicionamento em qualquer instante. O processo de mistura do ligante hidráulico com o solo desagregado pode ser influenciado por diversos factores. 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 o 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 siltosos resistências inferiores para as mesmas quantidades de cimento.

Como se encontra ilustrado na Figura 10, a utilização de painéis de solo-cimento com secção transversal rectangular 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 efectiva 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 optimizado.

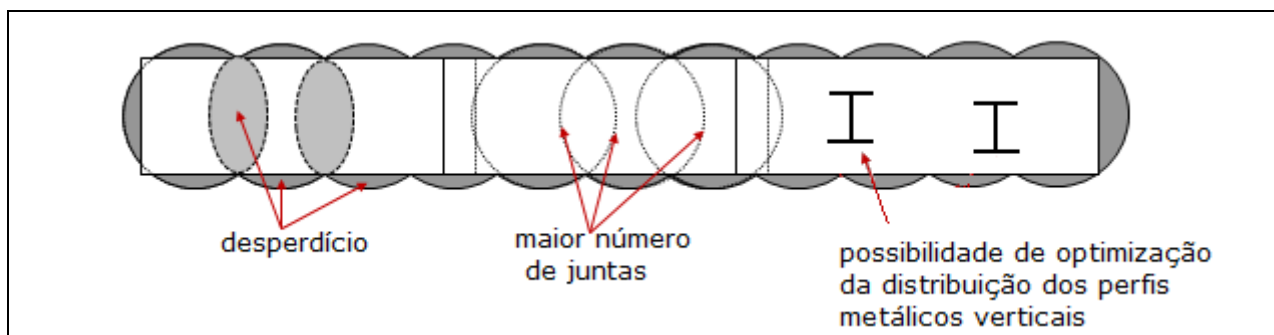


Figura 10 – Comparação da geometria rectangular dos painéis de CSM com as colunas obtidas nos métodos de DSM

4 - MODELO DE ANÁLISE DA ESTRUTURA DE CONTENÇÃO

A análise numérica efectuada 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, indicados no ponto 2.1, tendo-se recorrido ao modelo de comportamento *Morh-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 Figura 11 encontram-se indicadas numa planta da obra as seis secções analisadas (A, B, C, D, E e F).

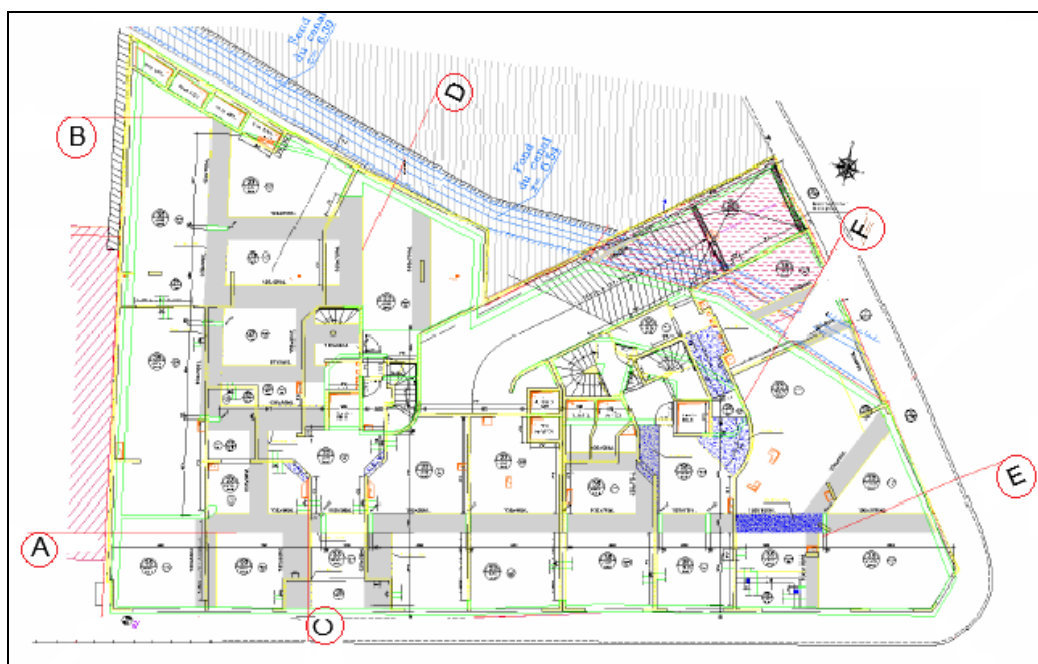


Figura 11 – Planta da obra com indicação das seis secções de cálculo consideradas

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

No caso da obra apresentada, a simulação do processo construtivo incluiu quatro fases principais. A fase inicial consistiu em modelar a execução da cortina, seguindo-se uma segunda fase em que se procedeu à simulação do primeiro nível de escavação, até uma profundidade de 0.5 m abaixo da cota do nível de escoramento. A terceira fase consistiu na introdução de um apoio elástico à cota do nível de escoramento e, por último, a simulação a escavação até à profundidade máxima.

Dadas as características da zona de intervenção e a respectiva 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.

Quadro 1- 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

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 efectuado 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 factor de segurança de 2, pelo que, apenas se aceitaram como válidos valores de resistência à compressão uniaxial iguais ou superiores a 4.0 MPa.

5 - EXECUÇÃO DOS TRABALHOS

A execução dos trabalhos na obra em estudo envolveu determinadas etapas características do processo de execução de uma estrutura de contenção em CSM, que são resumidamente descritas neste ponto.

Antes de se iniciar a execução dos painéis de CSM da estrutura de contenção, procedeu-se à realização de painéis de teste, dos quais foram recolhidas amostras de solo-cimento "em fresco" para submeter a ensaios laboratoriais de resistência à compressão uniaxial, permitindo efectuar a calibração do equipamento e proceder aos ajustes necessários para se atingirem os parâmetros de resistência definidos em projecto.

Uma vez calibrado o equipamento e os parâmetros de execução, realizaram-se os painéis de CSM da estrutura de contenção a partir da plataforma de trabalho. Os painéis foram executados sequencialmente por painéis primários e secundários, com uma sobreposição mínima de 0.20 m entre painéis adjacentes, o que permitiu assegurar que, pequenos desvios do equipamento, não colocassem em risco a ligação eficaz entre painéis. Durante a execução dos painéis de CSM o manobrador do equipamento tem acesso aos valores dos desvios da ferramenta de corte em cada instante através do painel de controlo do equipamento, podendo corrigir em tempo real o posicionamento da ferramenta de corte e inferir acerca da necessidade de repetição de um painel por desvios excessivos. Após a execução de cada painel foram colocados os perfis metálicos verticais IPE 450 que constituem a armadura do próprio painel. Na figura seguinte pode observar-se a ferramenta de corte utilizada na execução dos painéis de CSM da obra apresentada e um exemplo de um bloco rochoso recolhido no local da obra durante a escavação que pretende representar o tipo de materiais atravessados pelo equipamento.



Figura 12 – Ferramenta de corte (à esquerda) e bloco rochoso recolhido durante a escavação (à direita)

Uma vez executados os painéis de CSM foram recolhidas amostras para submeter a ensaios de resistência à compressão uniaxial em laboratório, de forma a validar os pressupostos admitidos em fase de projecto.

Após a execução de todos os painéis da estrutura de contenção, executou-se uma pequena escavação para execução da viga de coroamento para solidarização dos painéis de CSM e dos respectivos perfis

metálicos verticais. Procedeu-se então à escavação até 0.5 m abaixo da cota prevista para o travamento horizontal, seguindo-se a execução do escoramento metálico e das respectivas vigas de distribuição metálicas (Figura 13).



Figura 13 – Vistas da obra onde se podem observar as vigas de distribuição e as escoras metálicas

À medida que a escavação foi avançando, realizou-se uma parede em betão projectado com 0.15 m de espessura para revestimento dos painéis de CSM (Figura 14). Uma vez instalado o escoramento metálico, realizou-se a escavação até à profundidade máxima acompanhada de bombagem de água no fundo de escavação.



Figura 14 – Colocação da armadura (à esquerda) e projecção de betão para revestimento da parede de CSM (à direita)

Nas Figuras 15 e 16 podem observar-se algumas fotografias recolhidas durante a execução da obra.



Figura 15 – Vista parcial da obra após durante a sua execução (à esquerda) e pormenor de uma escora metálica tubular (à direita).



Figura 16 – Pormenor do escoramento metálico de canto (à esquerda) e vista parcial da obra durante a escavação abaixo do escoramento metálico (à direita).

6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação da tecnologia de CSM no caso da obra apresentada permitiu responder aos objectivos pretendidos, tendo sido possível, com o cenário geológico e hidrogeológico existente, a execução da escavação com altura de cerca de 12 m com apenas um nível de apoio horizontal.

No que respeita às vantagens de aplicação da tecnologia de CSM relativamente a tecnologias tradicionais, deve sublinhar-se a possibilidade de conhecimento da geometria exacta dos painéis de solo-cimento e dos desvios ocorridos em profundidade, bem como a versatilidade do equipamento utilizado. No caso particular desta obra, as duas vantagens referidas assumiram particular relevância dado que, por um lado, o conhecimento da geometria exacta 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 desde os aterros argilosos ao substrato rochoso dolomítico fracturado.

REFERÊNCIAS

- Bringiotti, M., Dossi, M., Nicastro D. (2009). Miscelazione profonda dei terreni: metodi classici e tecnologie innovative – CSM by BAUER. Geofluid 2009.
- 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.
- 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.