

# SOLUÇÕES DE MELHORAMENTO DO SOLO DE FUNDAÇÃO PARA A CONSTRUÇÃO DE UM EDIFÍCIO INDUSTRIAL RECORRENDO À TECNOLOGIA DE CUTTER SOIL MIXING

## SOLUTIONS FOR SOIL FOUNDATION IMPROVEMENT OF AN INDUSTRIAL BUILDING USING CUTTER SOIL MIXING TECHNOLOGY

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 são descritos os principais critérios adoptados ao nível da concepção e da execução das soluções de tratamento do terreno de fundação de um edifício industrial localizado em Frejus, França. Os condicionalismos relativos ao prazo de execução da obra aliados aos condicionalismos de natureza geológica e geotécnica existentes, conduziram à necessidade de conceber uma solução não convencional de tratamento dos solos de fundação, que consistiu na execução de painéis de solo-cimento através da tecnologia *Cutter Soil Mixing* (CSM). Do ponto de vista geológico e geotécnico o terreno abrangido pela obra caracteriza-se pela presença de uma camada de aterros com cascalho com pouca expressividade, sobrejacente a uma camada de solos coluvionares, caracterizados por apresentarem reduzidos valores de resistência e deformabilidade elevada, repousando, por sua vez, sobre o substrato competente de margas gresosas. Apresentam-se alguns aspectos de maior interesse relacionados com o processo de execução da obra e os resultados obtidos no âmbito do controlo de qualidade.

### ABSTRACT

This paper describes the most relevant design and execution aspects of foundation soil treatment to the construction of an industrial building at Fréjus, France. The time constraints related to the execution period of the work associated with the geological and geotechnical conditions, led to the adoption of a non-conventional solution of foundation soil treatment. The solution consisted of soil-cement panels, performed through the Cutter Soil Mixing technology. Geological and geotechnical analyses indicated that the soil at the work site is formed by a one meter thick layer of predominantly gravelly fills, superjacent to a 2-6 meter thick layer of colluvial soils with low strength and deformability, over a marl-sandstone substrate. This paper presents some of the aspects with greater interest related to the execution process and the main results of quality control of the work.

### 1 - INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de ocupação de zonas de terrenos aluvionares e coluvionares para a construção de novas estruturas tem conduzido à crescente procura de novas soluções de tratamento de solos e de fundações que permitam otimizar os prazos de execução e as questões económicas, respondendo em condições de segurança aos problemas encontrados. No enquadramento descrito, é apresentado neste artigo o caso de obra de um edifício industrial construído na cidade de Fréjus, em França, onde se recorreu à aplicação da tecnologia de *Cutter Soil Mixing* (CSM) para o melhoramento do solo de fundação, dada a presença no local interessado pela obra de um aterro sobrejacente a uma camada de solos coluvionares com características inadequadas para a fundação do novo edifício industrial.

O edifício apresenta uma geometria em planta aproximadamente rectangular com uma área de implantação de cerca de 3800 m<sup>2</sup>. Na Figura 1 pode observar-se a localização da obra em estudo.

A principal preocupação na concepção da solução apresentada centrou-se na minimização de assentamentos totais e diferenciais da estrutura do edifício. De acordo com o contexto geológico-geotécnico encontrado no local da obra, houve a necessidade de garantir a transmissão dos esforços da estrutura ao substrato de melhores características geomecânicas (Margas gresosas), detectado a profundidades variáveis, entre os 3 e os 7 m. A solução proposta para a referida transmissão de esforços ao estrato competente consistiu, na generalidade, na execução de uma malha regular de painéis de solo-cimento realizados através da tecnologia de CSM, executados sob uma camada de repartição de 0.60 m de altura em *tout-venant*, sobre a qual assentou a laje de fundo do edifício.

A tecnologia de CSM constitui uma alternativa às soluções mais tradicionais, com vantagens técnicas, económicas e ambientais, tendo sido já aplicada com sucesso no âmbito do melhoramento do solo de fundação em várias obras (Ameratunga et al., 2009; Pinto et al., 2010).



Figura 1 – Vista aérea da localização da obra (Google Earth, 2012)

O edifício a construir apresenta apenas um piso em altura e a respectiva envolvente é caracterizada pela ausência de construções adjacentes (Figura 2).

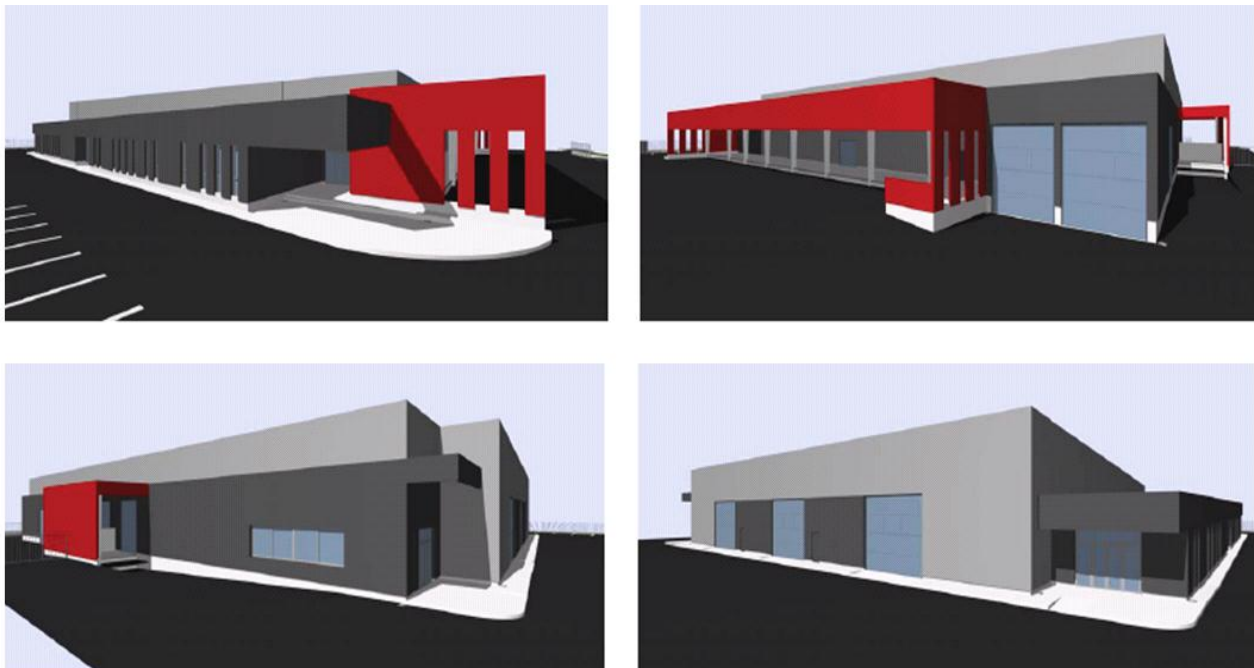


Figura 2 – Representação do aspecto final da obra

## 2 - PRINCIPAIS CONDICIONAMENTOS

### 2.1 - Condicionamentos de ordem geológica e geotécnica

A concepção da solução apresentada foi apoiada num estudo geotécnico que incluiu a realização de ensaios de penetração estática (CPT). A análise dos resultados obtidos permitiu identificar uma camada de aterros com cascalho até um metro de profundidade (Zona Geotécnica 1 - ZG1), sobrejacentes a uma camada de solos coluvionares caracterizados por apresentarem reduzidos valores de resistência e deformabilidade elevada (Zona Geotécnica 2 - ZG2), repousando por sua vez num substrato de margas gresosas (Zona Geotécnica 3 - ZG3) detectado a profundidades variáveis, entre os 3 e os 7 m (Figura 3).

	ZG1	ZG2	ZG3	
	Aterro com cascalho	Solos coluvionares	Margas gresosas	Aterro com cascalho 1 m
$\gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	19	17	21	Solos coluvionares 2 a 6 m
$c'$ [kPa]	0	5	10	Margas gresosas
$\phi'$ [°]	25	22	35	
E [kPa]	10000	5000	170000	

Figura 3 – Zonamento Geotécnico e principais parâmetros geomecânicos do terreno

## 2.2 - Condicionamentos relativos ao prazo de execução da obra

O prazo de execução da obra exigido pelo Dono de Obra foi de 4 semanas. Sendo este um aspecto de grande importância, as soluções propostas foram concebidas tendo presente a necessidade do cumprimento deste objectivo.

## 3 - DESCRIÇÃO DA SOLUÇÃO ADOPTADA

No enquadramento descrito, a solução adoptada para garantir a correcta transmissão de esforços ao terreno competente consistiu na execução de 118 painéis de CSM, com secção transversal rectangular de dimensões 0.60 m x 2.40 m, dispostos numa malha quadrada em planta (Figura 4). Os painéis de CSM foram executados até profundidades variáveis entre 3.5 m e 7.5 m, com vista a garantir um encastramento mínimo dos mesmos de 0.5 m no estrato competente (Margas gresosas).

Para permitir um encaminhamento eficaz das cargas para os painéis de CSM foi prevista a execução de capitéis de encabeçamento dos painéis com 1.0 m de altura e uma geometria rectangular com dimensões em planta de 3.6 m x 1.8 m, realizados através de uma pré-escavação com a geometria do capitel, posteriormente preenchida pelo refluxo resultante da execução do painel de CSM em profundidade.

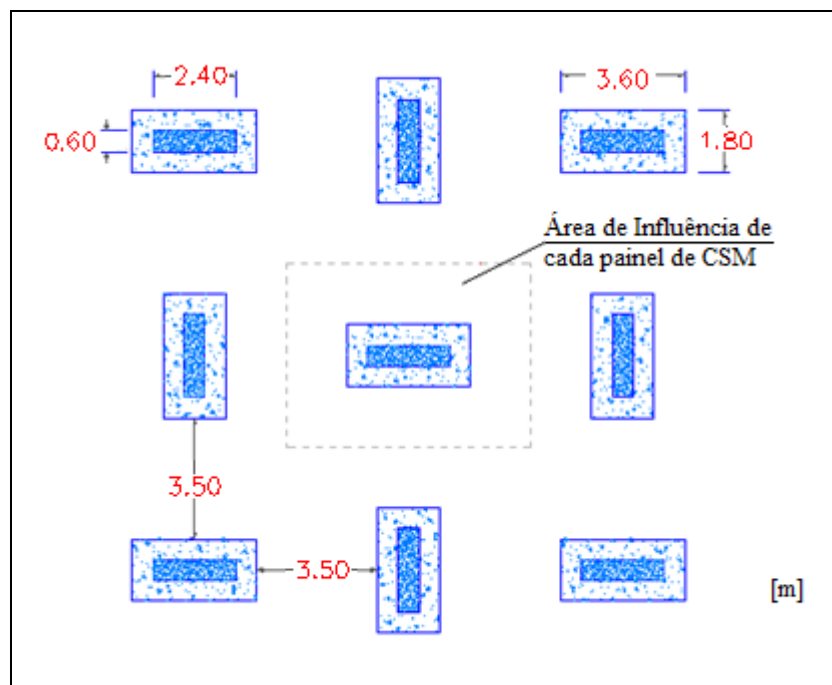


Figura 4 - Disposição em planta dos painéis CSM

A solução incluiu ainda a execução de uma camada de repartição de 0.60 m de altura em *tout-venant*, sob a qual foi executada posteriormente a laje de fundo do edifício. Nas figuras 5 e 6 pode observar-se, respectivamente, um corte-tipo e a planta geral da solução executada.

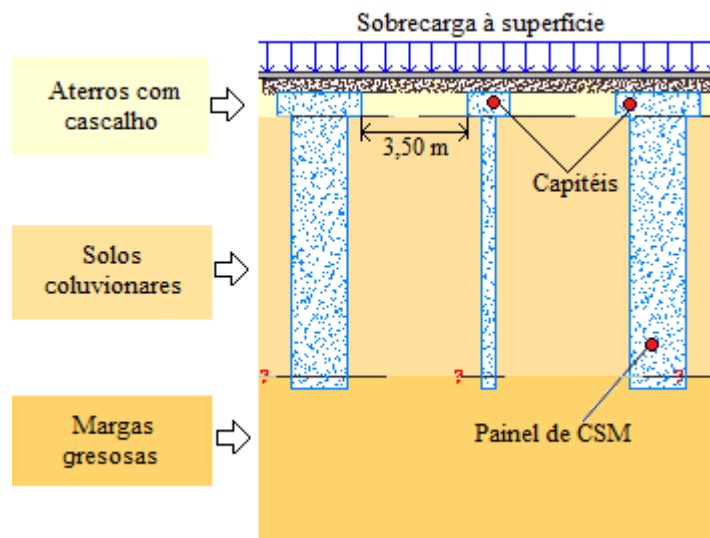


Figura 5 - Corte-Tipo da solução de melhoramento do solo de fundação

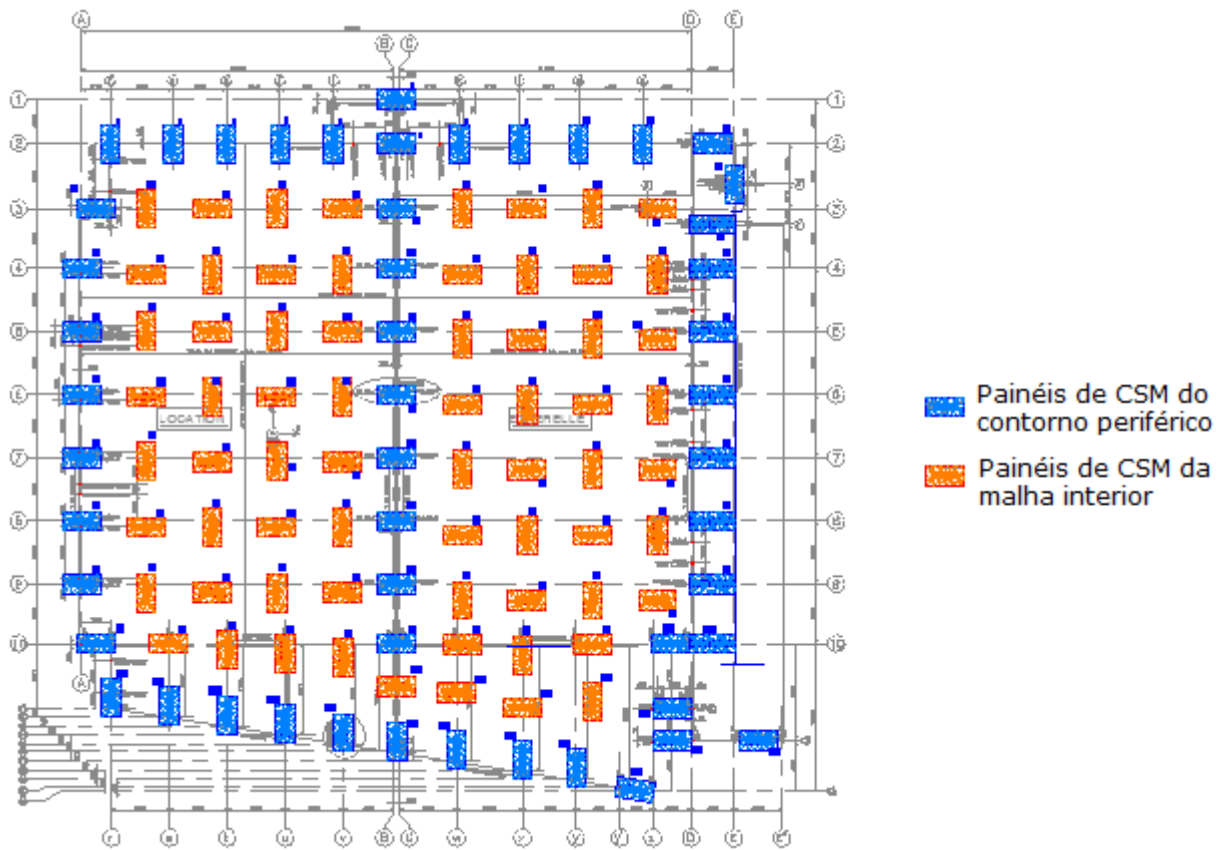


Figura 6 - Planta da solução de melhoramento do solo de fundação

A figura seguinte mostra uma vista da obra onde é possível observar a superfície de alguns capitéis dos painéis de CSM executados.





Figura 7 - Vista dos capitéis de alguns dos painéis de CSM executados

Com a aplicação desta solução foi possível cumprir o prazo de execução exigido de 4 semanas, o que se traduziu num ritmo de execução médio de 6 painéis de CSM por cada dia de trabalho.

A tecnologia de CSM consiste, de uma forma geral, na mistura mecânica do solo *in situ* com um ligante hidráulico, normalmente calda de cimento, obtendo-se painéis de solo-cimento de secção transversal rectangular, dotados de características de resistência e de deformabilidade que permitem a sua aplicação a problemas como o que se descreve no presente documento e em outros casos como, por exemplo, estruturas de contenção e paredes de impermeabilização (Gerressen et al., 2009). A ferramenta utilizada, à semelhança do que acontece na tecnologia de paredes moldadas, é a hidrofresa, constituída neste caso por dois conjuntos de rodas de corte que giram em torno de eixos horizontais (Figuras 8 e 9).

O equipamento utilizado apresenta a versatilidade de permitir o atravessamento de todos os tipos de solos, destacando-se ainda a possibilidade de utilização do terreno *in situ* como material de construção, a minimização do volume de materiais a vazadouro e o conhecimento da geometria exacta do material tratado em profundidade.



Figura 8 - Equipamento utilizado para a execução dos painéis de CSM



Figura 9 – Vistas do equipamento durante a execução de um painel de CSM

#### 4 - MODELO DE ANÁLISE

Numa fase inicial, a malha de painéis CSM foi definida com base na limitação da tensão de compressão nos painéis de CSM, quando sujeitos a cargas de serviço, ao valor máximo de 1.5 MPa, admitindo-se, pelo lado da segurança, a transmissão de toda a carga do edifício para os painéis de CSM.

Tendo por base a malha de painéis definida na fase inicial do estudo, procedeu-se posteriormente à análise do comportamento da solução em termos de assentamentos, recorrendo a um modelo numérico de elementos finitos, através do programa de cálculo Plaxis<sup>®</sup>. Para a modelação do terreno existente, da camada de *tout-venant* e dos painéis de CSM, recorreu-se ao modelo de comportamento *Mohr-Coulomb*, disponibilizado no programa de cálculo, tendo-se adoptado os parâmetros geomecânicos indicados no ponto 2.1 do presente artigo.

Para a avaliação dos efeitos da variação de determinados parâmetros nos valores finais dos assentamentos, foram também efectuadas análises paramétricas. Uma das referidas análises paramétricas consistiu na variação do módulo de deformabilidade da camada de *tout-venant*. A laje em betão armado foi simulada com comportamento linear elástico considerando um módulo de deformabilidade estimado tendo em conta os efeitos de fluência.

Na Figura 10 pode observar-se a geometria simplificada, a malha de elementos finitos e as condições fronteira consideradas na análise numérica efectuada.

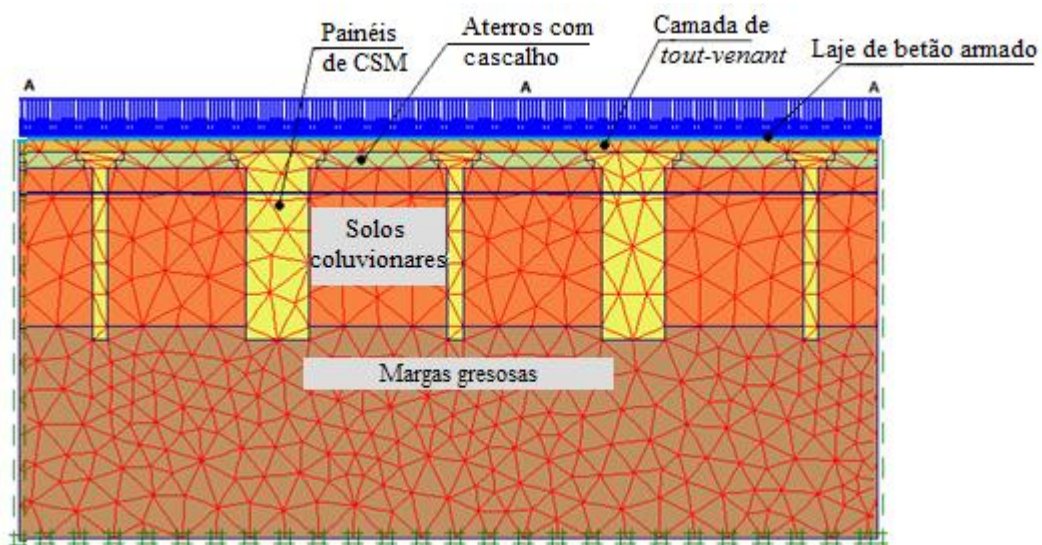


Figura 10 - Modelo de cálculo: Geometria simplificada, malha de elementos finitos e condições fronteira consideradas



No caso da obra em estudo, obtiveram-se distorções angulares inferiores a 1/800 em todas as análises efectuadas, encontrando-se os valores obtidos dentro dos limites estabelecidos como aceitáveis para o bom comportamento da obra. A distorção angular ( $\beta$ ) é definida como a relação entre o assentamento diferencial ( $\Delta l$ ) entre dois pontos e a respectiva distância entre os pontos ( $l$ ). O valor do assentamento total máximo obtido nas análises efectuadas foi de aproximadamente 11 mm.

Na figura seguinte pode observar-se, a título de exemplo, o aspecto da deformada obtida numa das análises efectuadas.

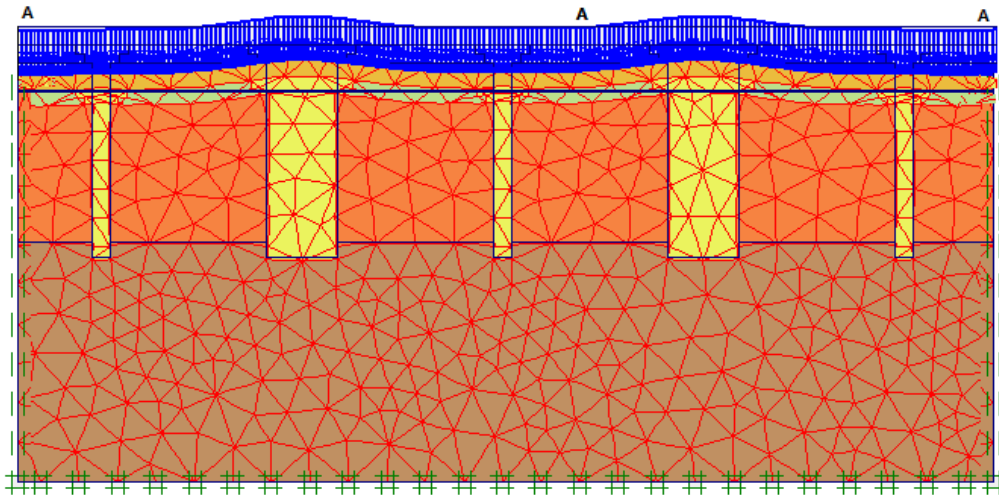


Figura 11 - Deformada obtida na modelação numérica

## 5 - CONTROLO DE QUALIDADE

A obtenção de boas soluções por aplicação da tecnologia de CSM é fortemente condicionada por diversos factores como por exemplo as características do solo que serve de base ao tratamento, os requisitos específicos de cada projecto, a experiência do projectista, a disponibilidade de equipamento apropriado e de pessoal qualificado, entre outras. As particularidades associadas ao processo de execução da tecnologia de CSM e, sobretudo, a utilização do solo *in situ* como material de construção, tornam fulcral o controlo de qualidade durante a execução. Este controlo é efectuado numa primeira fase durante a execução dos painéis de CSM pelo manobrador do equipamento que através do painel de controlo do equipamento acede em tempo real aos parâmetros de execução. O manobrador do equipamento efectua o ajuste dos parâmetros de execução de forma a otimizar o aproveitamento da energia e criar uma massa de material homogéneo que permita facilmente a descida e a subida do equipamento, podendo ajustar também a posição da ferramenta de corte sempre que é detectado um ligeiro desvio (Bringiotti et al., 2009). Na Figura 12 pode observar-se o painel de controlo do equipamento de execução do CSM.



Figura 12 - Painel de controlo do equipamento

O controlo de execução é ainda efectuado através de ensaios de resistência à compressão uniaxial realizados sobre provetes recolhidos dos painéis CSM. O conhecimento dos parâmetros de resistência do

solo-cimento permite ajustar os parâmetros de execução de forma a obter soluções adequadas aos objectivos pretendidos, bem como avaliar a qualidade e a fiabilidade da solução final obtida. No caso da obra apresentada, foram recolhidos provetes "em fresco" dos painéis CSM da obra em estudo que posteriormente foram submetidos a ensaios de resistência à compressão uniaxial. No Quadro 1 encontram-se resumidos os valores médios de resistência obtidos nas duas séries de ensaios realizadas.

Quadro 1- Valores médios obtidos nos ensaios de resistência à compressão uniaxial: provetes de solo-cimento ensaiados aos 7 dias de idade

	Série I	Série II
Tensão de rotura à compressão uniaxial (MPa)	7.0	6.5

Analisando os valores médios apresentados no Quadro 1, verifica-se que a resistência média dos provetes aos 7 dias de idade é de 7.0 MPa e 6.5 Mpa na Série I e na Série II de ensaios, respectivamente. Os valores obtidos são bastante superiores ao valor exigido para validação dos pressupostos de projecto (3 MPa), tendo por isso sido dispensada a realização de ensaios aos 14 e 28 dias de idade, como é prática corrente em obras onde é aplicada a tecnologia de CSM.

## 6 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de tecnologias que permitem a utilização do solo *in situ* como material de construção, como é o caso da tecnologia de CSM aplicada no caso da obra descrita no presente artigo, constitui uma solução alternativa às mais tradicionais, com vantagens técnicas, económicas, ambientais e de tempo de execução.

No caso da obra apresentada (Figura 13), a integração do solo existente na solução final associada ao aproveitamento do refluxo resultante da execução dos painéis de CSM para materializar os capitéis de encabeçamento, fez com que fosse nula a quantidade de material a vazadouro resultante do processo de execução. A solução apresentada permitiu responder, na generalidade, aos objectivos pretendidos quer em termos económicos e de prazo de execução, quer em termos do seu bom comportamento enquanto solução de melhoramento do solo de fundação.



Figura 13 – Vistas do exterior do edifício industrial executado

## REFERÊNCIAS

- Ameratunga, J., Brown, D., Ramachadran, R. and Denny, R. (2009). Ground improvement for a large above ground storage tank using cutter soil mixing columns. *Proceedings of the 17th ICSMGE*, pages 2280-2283.
- Bringiotti, M., Dossi, M. and Nicastro, D. (2009). Miscelazione profonda dei terreni: metodi classici e tecnologie innovative – CSM by BAUER. *Geofluid 2009*.
- Gerressen, F. W., Schopf, M. and Stotzer, E (2009). CSM – Cutter Soil Mixing – Worldwide experiences of a young soil mixing method. *Proceedings of International Symposium on Deep Mixing & Admixture Stabilization*, Okinawa, Japan.
- Pinto, A., Albuquerque Nuncio, J., Tomásio, R., Morais Sarmiento, M. e Peixoto, A. (2010). Soluções de fundações indirectas no colégio Pedro Arrupe – Parque das Nações. *Actas do XII CNG – Congresso Nacional de Geotecnia*, Guimarães.