

XX Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica
IX Simpósio Brasileiro de Mecânica das Rochas
IX Simpósio Brasileiro de Engenheiros Geotécnicos Jovens
VI Conferência Sul Americana de Engenheiros Geotécnicos Jovens
XI Congresso Luso Brasileiro de Geotecnia
23 a 26 de Agosto de 2022 – Campinas – SP



COBRAMSEG 2022
23 A 26 DE AGOSTO | CAMPINAS | SP | BRASIL
COBRAMSEG | SBMR | GEOJOVEM | CLBG

Tratamento de solos com recurso a colunas de Deep Soil Mixing para um aterro sanitário em Biguaçu, Brasil

Nuno Braz da Silva

Coordenador de Projeto, JETsj, Belo Horizonte, Brasil, nsilva@jetsj.com

Alexandre Pinto

Diretor de Projeto, JETsj, Belo Horizonte, Brasil, apinto@jetsj.com

Marcelo Felix

Diretor Comercial, Tecnogeo Ground, São Paulo, Brasil, marcelo.felix@tecnogeo.com.br

Fabio Brumano

Gerente Técnico-Comercial, Tecnogeo Ground, São Paulo, Brasil, fabio.brumano@tecnogeo.com.br

RESUMO: A expansão do aterro sanitário da Tijuquinha, situado no município de Biguaçu no Estado de Santa Catarina, Brasil ocorre sobre argilas moles com valores de resistência de ponta do ensaio CPTu, q_t , inferiores a 1 MPa e módulo edométrico, no intervalo entre 1 MPa a 3 MPa. A presença de formações com fracas características de resistência e deformabilidade para a implantação do aterro sanitário, RSU, e o muro perimetral delimitador da expansão do aterro permitiu adotar uma solução de estabilização, tratamento de solos e fundação, através de colunas de solo-cimento, materializados através da tecnologia de deep soil mixing (DSM), para a expansão da área de implantação do aterro sanitário da Tijuquinha em Biguaçu, no estado de Santa Catarina, Brasil.

PALAVRAS-CHAVE: Melhoramento de solos, Mistura Profunda, Aterro sanitário, Fundações.

ABSTRACT: The expansion of the sanitary landfill of Tijuquinha, occurs on soft clays with tip resistance values of the CPTu test, q_t , lower than 1 MPa and edometric modulus between 1 MPa to 3 MPa. The presence of formations with weak characteristics of resistance and stiffness in the peripheral wall and landfill area need to implement a solution of stabilization, soil treatment and foundation, through soil-cement columns, materialized through deep soil mixing (DSM) technology, for the expansion of the area of implementation of the Tijuquinha landfill in Biguaçu, Santa Catarina, Brazil.

KEYWORDS: Soil Treatment, Deep Soil Mixing, Sanitary landfill, Foundations.

1 Introdução

A necessidade de expansão de áreas de aterros sanitários para o crescente volume de resíduos urbanos, tratados de forma controlada implica, por vezes, necessidade de conquista de áreas em solos de fundação com características de resistência baixas o que obriga ao estudo de soluções que promovam a estabilidade das estruturas próximas, tais como muros delimitadores e a estabilidade dos taludes dos aterros sanitários. De modo a solucionar este desafio foram executadas colunas de mistura de solo-cimento em profundidade de modo a promover o aumento da resistência ao cisalhamento de todo o conjunto de solo tratado, tal como transmitir as cargas provenientes do muro de suporte, em profundidade, para as formações competentes.

A presença de alguns fatores inibidores da hidratação do cimento, tal como um PH baixo < 5 e a presença de matéria orgânica dissolvida na água superior a 2%, obrigou a estudos adicionais para a estabilização química da mistura de cimento utilizando cimentos pozolânicos [4].

A obra situa-se no município de Biguaçu (Figura 1) sendo a área de expansão a assinalada a amarelo (Figura 2).



Figura 1 – Vista geral da zona da intervenção

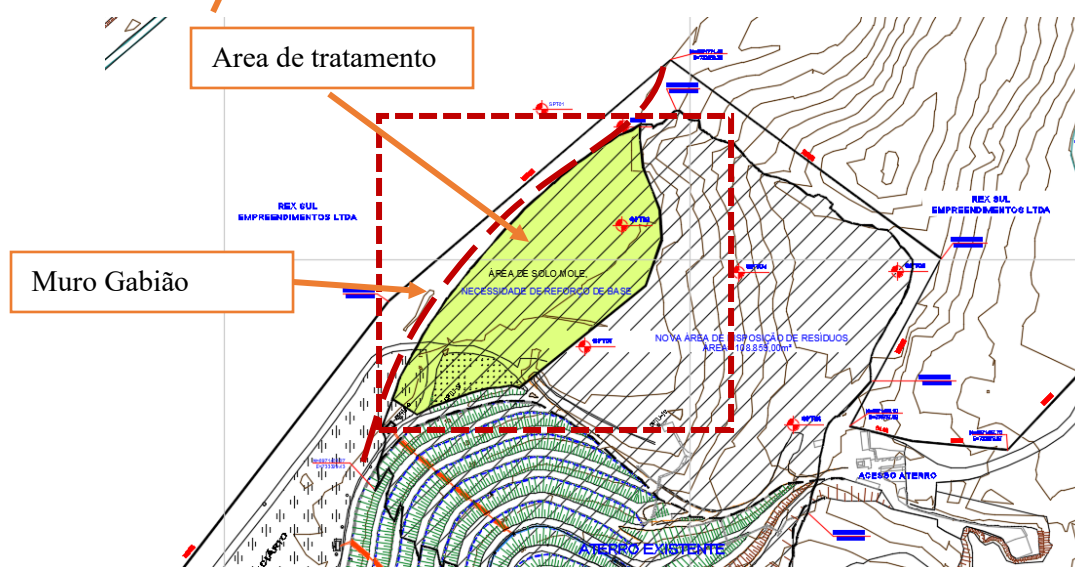


Figura 2– Vista geral da zona da intervenção

2 Geologia

Para a área de intervenção foram realizadas sondagens de reconhecimento com a caracterização das diferentes litologias atravessadas e a execução de ensaios SPT tal como, a realização de ensaios CPTu com a medição das poro-pressões de modo a determinar os parâmetros geotécnicos necessários para o dimensionamento das soluções de tratamento dos solos. Adicionalmente foram efetuadas análises químicas à água de modo a avaliar o pH da água e o teor em matéria orgânica presente nos solos e na água.

A geologia local apresenta a seguinte litologia:

Aterros: materiais recentes pouco consolidados: Constituído por solos argilosos, de consistência média a rija (valores de NSPT no intervalo 4 (S1) a 12 (S7) entre os 0,00m e os 3,00m de profundidade;

Depósitos de Baía São Miguel - Holocénico: solos moles: Constituído por solos argilosos, de consistência mole a muito mole (valores de NSPT no intervalo 2 (S1) a 3 (S1), de resistência ao corte, S_u , da ordem dos 20 kPa (CPTU 26) e de resistência de ponta, q_t , da ordem dos 1MPa, entre os 3,00m e os 6,50m de profundidade;



Depósitos Residuais de Granito – Siltes arenosos: Constituído por solos siltosos argilo-arenosos, muito compactos (valores de NSPT no intervalo 17 (S7) a 50 (S1) após os 6,50m de profundidade.

Na Figura 3 podemos observar um ensaio CPTU típico da área de intervenção onde se observa resistência de ponta inferiores a 1MPa entre os 5,5m e os 10m de profundidade e com uma evidente geração de excesso de poro-pressão nessa camada de argila mole revelando um comportamento não drenado característicos destes materiais.

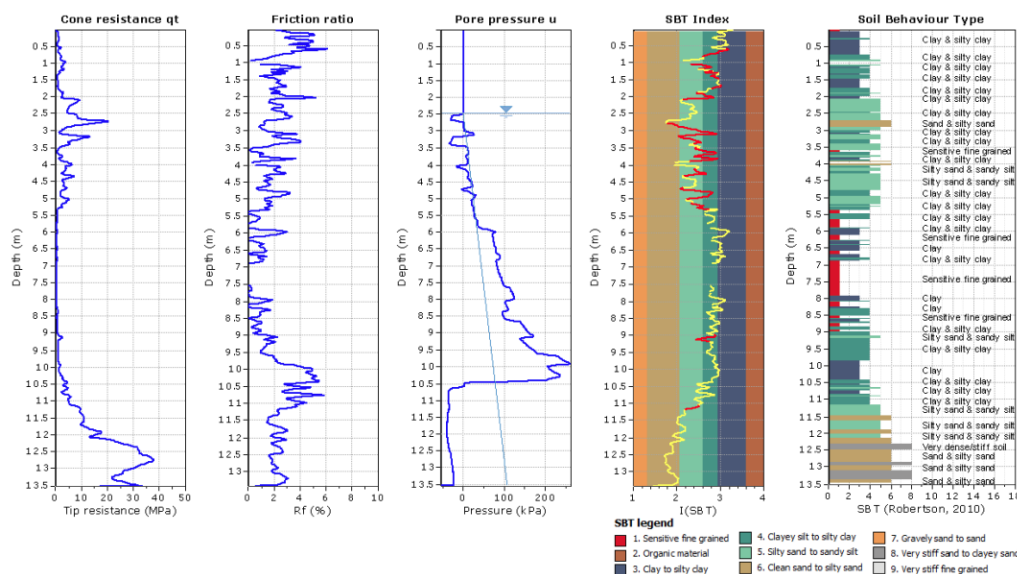


Figura 3. Ensaio CPTU 20

Os parâmetros geotécnicos adotados para a simulação do comportamento dos solos e dos materiais interessados para as análises de estabilidade e fundação foram estimados com base nos ensaios realizados e podem ser consultados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do solo

Formações Modeladas	ϕ' (°)	c' (kPa)	γ_h (kN/m ³)	E'_{50} (MPa)
Aterros	25,0	15,0	18,0	10,0
Depósitos de Baía S. Miguel: Solos moles	15,0	5,0	16,0	1,0
Depósitos Sedimentares: Siltes arenosos	35,0	0,0	18,0	30,0
Rocha: Granitos	40,0	60,0	19,0	100,0

- γ_h Peso específico húmido;
- ϕ' Ângulo de atrito interno;
- E'_{50} Módulo de deformabilidade para carregamento a 50% da tensão máxima;
- c' Coesão drenada.

As propriedades propostas para as colunas de DSM são de uma forma simplificada em função do solo, dosagem de cimento e definição do UCS de cálculo.

Para o presente projeto estimamos os seguintes parâmetros de resistência e deformabilidade para as colunas DSM [5]

- Colunas DSM
 - UCS: 1,0 MPa;
 - Resistência à tração ftd: 15% UCS 0,15 MPa
 - Módulo E'_{50} : 180 MPa.



3 Soluções geotécnicas adotadas

No âmbito da solução desenvolvida para a execução do aterro e construção dos muros de Gabião, o tratamento dos depósitos de Baía de consistência mole a muito mole foi obtido pela inclusão de elementos de solo-cimento. No essencial, a técnica consiste na execução de colunas de deep soil mixing (DSM), com uma seção circular de diâmetro 0,90m ($A = 0,630\text{m}^2$) e dispostos de uma forma favorável à materialização de elementos rígidos transversais ao desenvolvimento do muro de Gabiões, eficazes para a verificação da estabilização do talude projetado para o aterro sanitário da Tijuquinha.

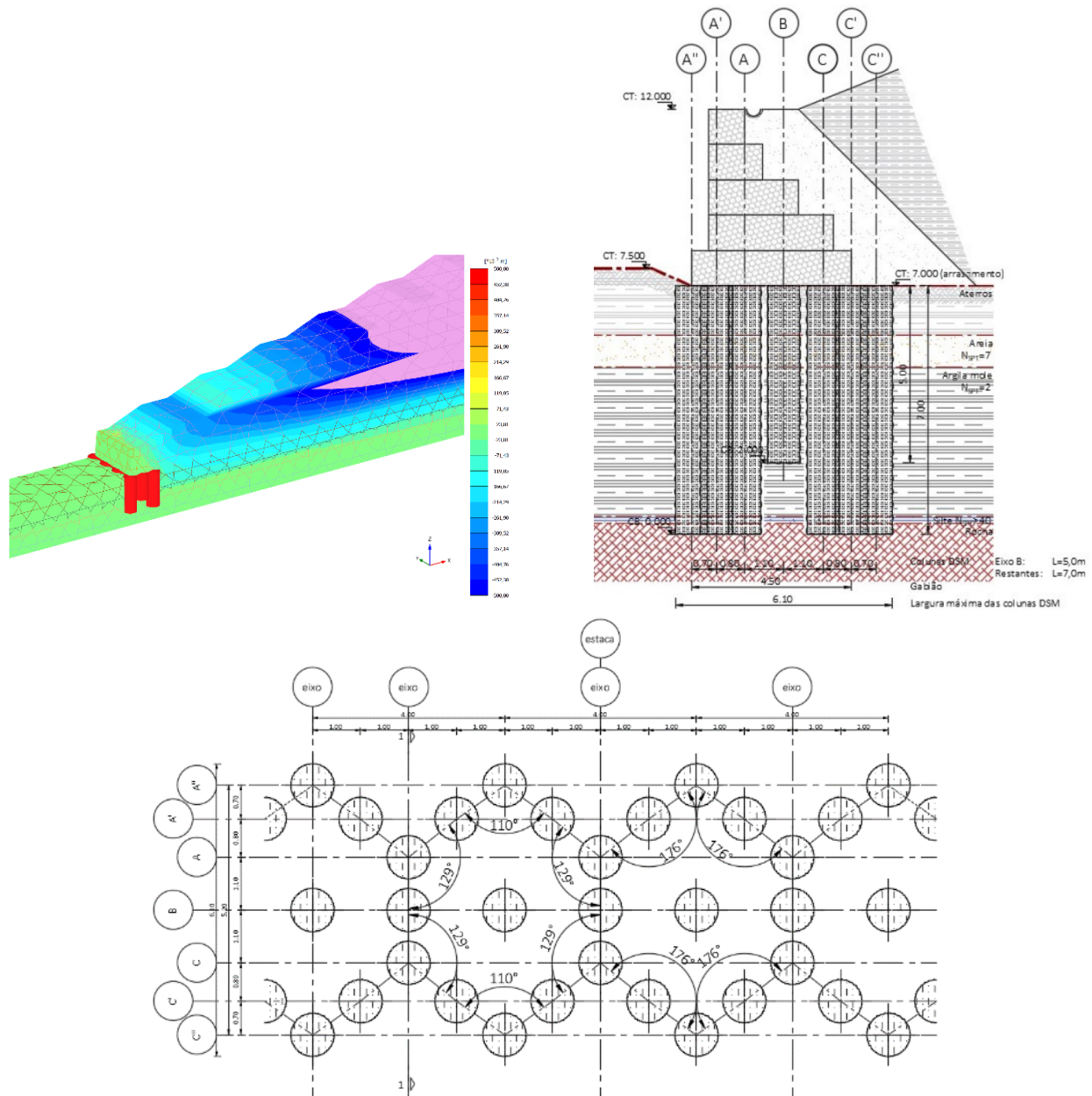


Figura 4 – Modelo Plaxis 3D e seção da solução de colunas DSM

As soluções preconizadas foram dimensionadas com recurso a modelos de elementos finitos, Plaxis 3D, para determinação dos esforços e deslocamentos compatíveis com os limites definidos no âmbito da ABNT e Eurocódigos [1].



3.1 Modelagem

No dimensionamento das colunas de DSM considerou-se que a totalidade das cargas provenientes dos empuxos e do peso próprio do muro de gabiões são encaminhadas diretamente para as colunas, sem necessidade de mobilizar as formações moles.

Para a verificação da estabilidade de taludes considera-se os parâmetros equivalentes a um solo tratado recorrendo ao conceito de percentual de área melhorada [2] [4].

$$a_p = \frac{A_p}{d_1 \times d_2} \quad (1)$$

$$a_p = \frac{781 \times 0,63}{309 \times 6,5} = 0,25 \rightarrow 25\% \quad (2)$$

Onde

- a_p : Percentual de área melhorada;
- A_p : Área da coluna DSM;
- d_1, d_2 : comprimento x largura.

A opção por adotar uma malha de colunas com a criação de elementos rígidos perpendiculares ao talude pode ser facilmente entendido na Figura 5, onde se opta pela materialização de paredes rígidas por forma a melhorar a resistência ao cisalhamento das superfícies circulares de rotura.

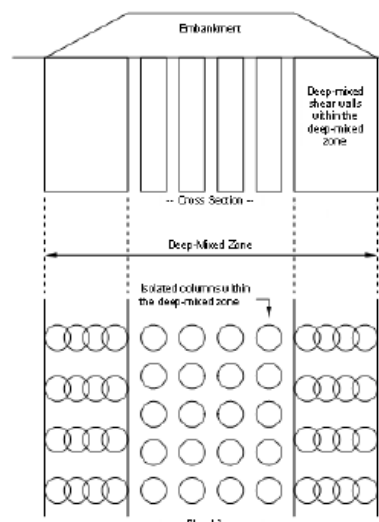


Figura 5 – Malhas típicas de arranjo das colunas

Determinação do valor característico da resistência à compressão simples, aos 28 dias com base numa distribuição lognormal [1] [2] [4]:

$$qu_{ck} = \overline{UCS} - K\sigma \quad (3)$$

$$qu_{ck} = 1,00 - 1,1 \times 0,1 = 0,89 \text{ MPa} \quad (4)$$



3.2 Análise numérica

A análise numérica de tensão x deformação foi efetuada em Plaxis 3D com o objetivo de discretizar as colunas de DSM com elementos de volume e sobre os quais são determinados os esforços ao longo do seu eixo a partir das tensões geradas durante a simulação do processo construtivo.

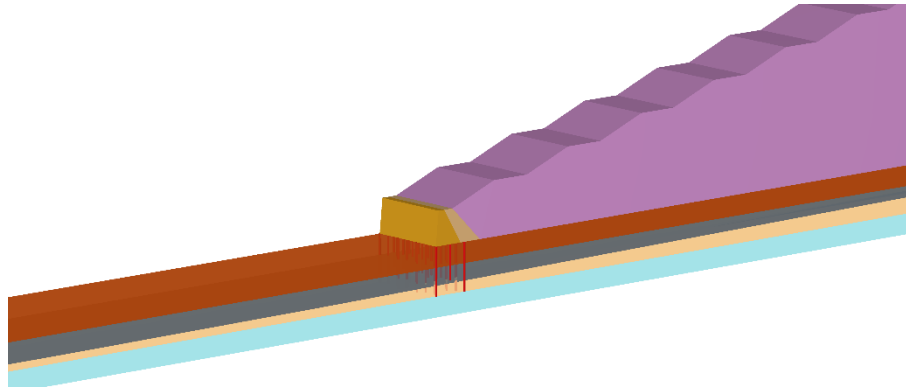


Figura 6 - Modelo de cálculo

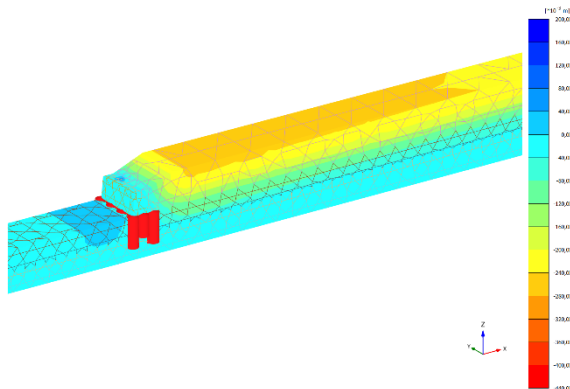


Figura 7 – Recalques após construção do muro de Gabiões, $\delta = 9\text{mm}$

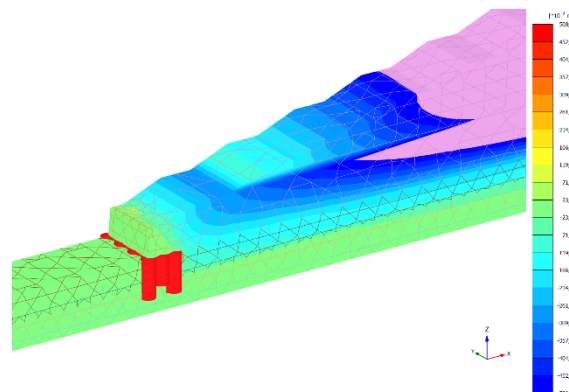


Figura 8 – Recalques a longo-prazo, $\delta = 11\text{mm}$

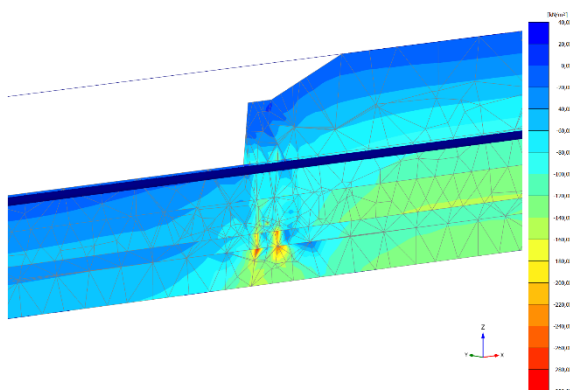


Figura 9 - Tensões deviatórias

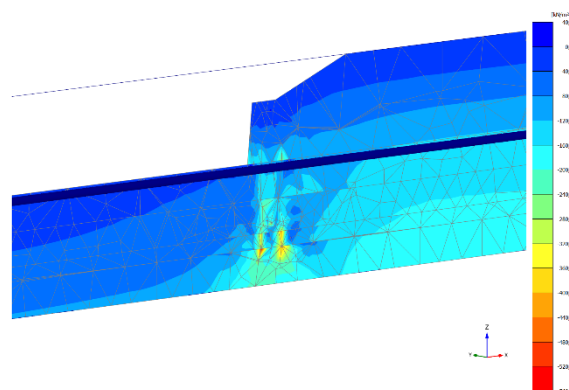
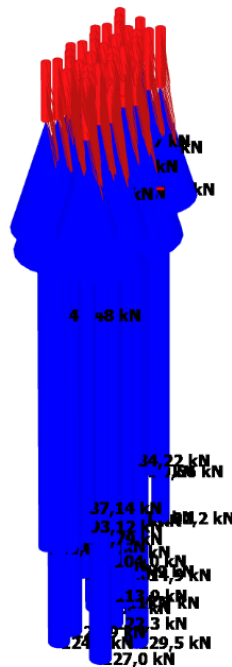


Figura 10 – Tensão efetiva máxima de 530kPa na base das colunas DSM

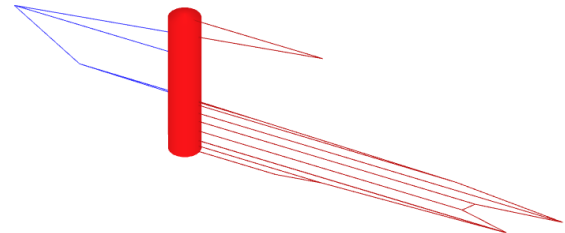


Axial forces N (scaled up 0,0500 times)

Maximum value = -10,32 kN (Element 272 at Node 63385)

Minimum value = -368,8 kN (Element 70 at Node 62961)

Figura 11 – Esforços de compressão



Shear forces Q₁₂ (scaled up 0,500 times)

Maximum value = 11,92 kN (Element 273 at Node 63387)

Minimum value = -26,39 kN (Element 275 at Node 63391)

Figura 12 – Esforços de cisalhamento

Na Figura 7 a Figura 12 podemos observar os principais resultados obtidos, no modelo, onde se evidencia o controle de tensões atuantes na base das colunas, no contato, com os solos residuais. Da mesma forma podemos observar que as forças de compressão estão dentro do limite proposto para a solução [1].

$$N_{Rd} = \frac{qu_{ck}}{\gamma_m} \times A = \frac{890}{1,5} \times \pi \frac{0,90^2}{4} = 377kN \geq N_{sd} = 369kN \quad (5)$$

Relativamente aos esforços de cisalhamento, a verificação da segurança dá-se da seguinte forma:

$$V_{Rd} = \frac{A_v \times 0,15 \times qu_{ck}}{\sqrt{3} \times \gamma_m} = \frac{0,63 \times 0,15 \times 890}{\sqrt{3} \times 1,5} = 32,4kN \geq N_{sd} = 26,39kN \quad (6)$$

Os recalques máximos obtidos a longo-prazo para as colunas DSM foram os seguintes:

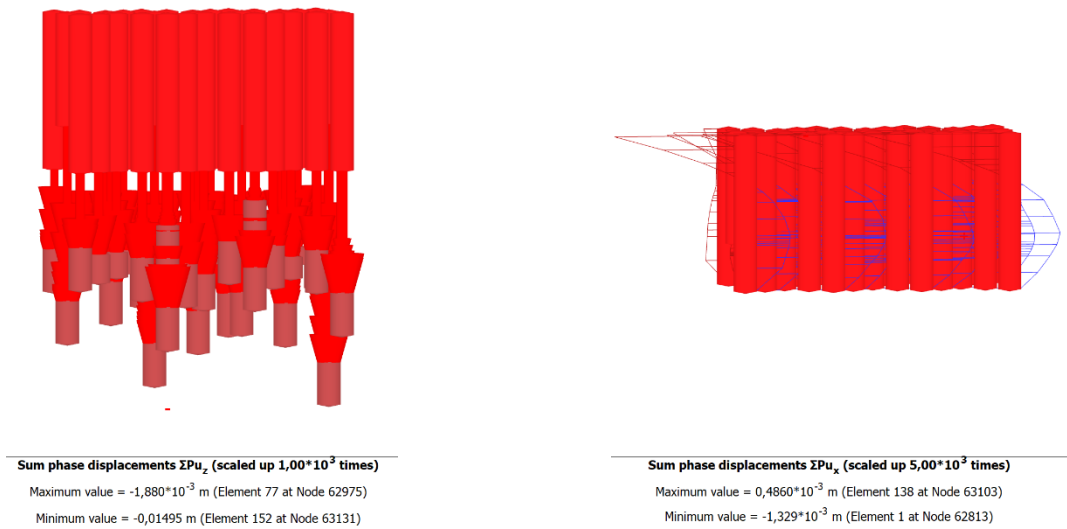


Figura 13 – Recalques e deslocamentos horizontais

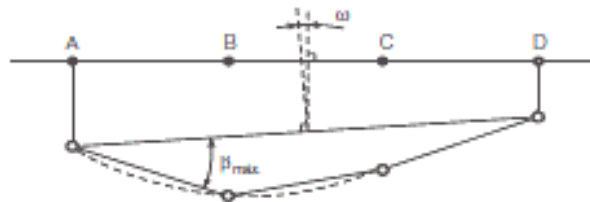


Figura 14 - Recalque diferencial máximo, $\beta_{\max}$

Recalque Absoluto:

$$\Delta_{\max} = 15\text{mm} < 20\text{mm} \text{ (Valor de referência)} \quad (7)$$

Recalque diferencial, considera-se um valor $\beta < 1/500$, pelo que obtemos,

$$\beta_{\max} = \frac{L}{500} = \frac{2}{500} = 4\text{mm} > \delta = 2\text{mm}/0,70\text{m} = 2,9\text{mm} \quad (8)$$

A verificação da segurança para a estabilidade do talude ocorre com um valor de $FS = 1,60$.

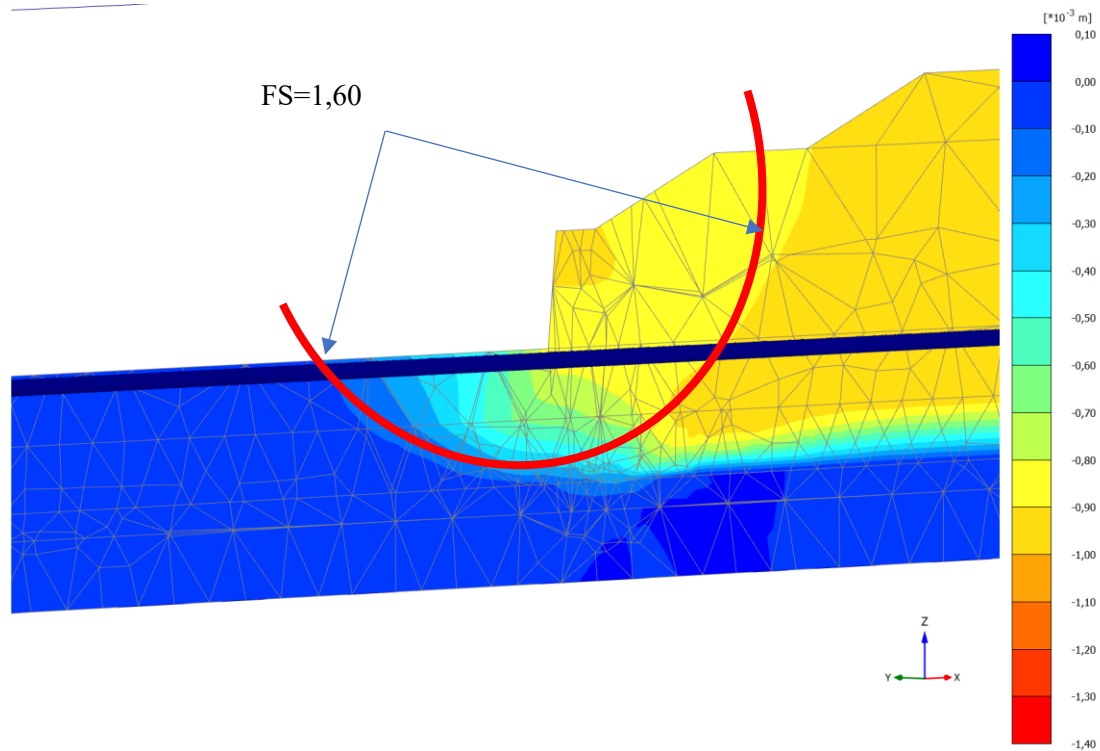


Figura 15 - Fator de segurança, $FS = 1,60$

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Dono de Obra: VEOLIA PROACTIVA, e ao empreiteiro especialista geotécnico TECNOGEO GROUND pela permissão para a redação e apresentação do presente artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NP EN 1997-1:2010 Eurocódigo N°7 – Projeto de Estruturas Geotécnicas;
- [2] EN 14679:2005 Execution of Special Geotechnical Work – Deep Mixing;
- [3] Design manual for excavation support using deep mixing technology;
- [4] FHWA deep soil mixing manual.
- [5] Federal Highway Administration Design Manual (2013) Deep Mixing for Embankment and Foundation Support. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration