

Analises de Tensão-deformação do Tratamento de Fundações de uma Barragem de Rejeito com Colunas de Brita Injetadas

Fabio Silva

Gerente Técnico, JETsj Brasil, Belo Horizonte, Brasil, fsilva@jetsj.com

Miriam Lopes

Engenheira Geotécnica, JETsj, Lisboa, Portugal, mlopes@jetsj.com

Nuno Silva

Diretor Técnico, JETsj Brasil, Lisboa, Portugal, nsilva@jetsj.com

RESUMO: A presença de solos residuais de baixa resistência e elevada deformabilidade na projeção do futuro maciço de alteamento a jusante de uma barragem de rejeitos exigiu a implementação de tratamento para garantir a estabilidade da barragem e controlar os recalques diferenciais do futuro maciço. Os solos em questão têm matriz arenosa, com presença de material siltoso entremeado e pedregulhos, apresentando estrutura metaestável, corroborada pela baixa resistência identificada nos ensaios de campo, com $N_{SPT} < 2$ e resistência de ponta do piezocone, praticamente nula. Quatro soluções para o tratamento desse material foram estudadas e testadas em campo. No entanto, apenas uma foi bem-sucedida. A solução de tratamento adotada consistiu em colunas de brita associado a injeções cimentícias de baixo módulo de deformabilidade. Através de análises de tensão-deformação 2D e 3D, avaliou-se, por meio de 29 cenários, os efeitos da variabilidade de rigidez das colunas na eficiência da solução de tratamento. Os resultados dos modelos 3D demonstraram uma tendência de concentração de tensões nas colunas mais rígidas, especialmente nos cenários em que há maior contraste de rigidez entre uma ou mais colunas e aquelas do seu entorno, levando à plastificação destas colunas e consequente aumento dos recalques da fundação, quando comparado aos modelos bidimensionais.

PALAVRAS-CHAVE: barragem de rejeitos, colunas de brita, análise de sensibilidade, rigidez, tensão-deformação, injeções cimentícias

ABSTRACT: The presence of low-strength residual soils with high deformability in the projection of a tailings dam's future downstream slope, following its raising, imposed the implementation of ground improvement measures. These measures were crucial to ensure the stability of the dam and control differential settlements beneath the future embankment. The soils in question exhibit a sandy matrix interspersed with silty material and gravel, revealing a metastable structure. This metastability feature was corroborated by their low resistance observed during field tests, with $N_{SPT} < 2$ and very low cone penetration tip resistance. Four ground improvement solutions were thoroughly studied and field-tested for this material, but only one proved successful. The adopted ground improvement approach involved the use of Stone Columns combined with low-modulus cement injections. By conducting 2D and 3D stress-strain analyses, the impact of column stiffness variability on the ground improvement solution's efficiency across 29 scenarios was evaluated. Notably, the 3D model results indicated stress concentration tendencies in the stiffer columns, particularly in scenarios with significant stiffness contrast between one or more columns and their surrounding counterparts. This phenomenon led to the plastification of these columns and subsequent increased foundation settlements when compared to the 2D models.

KEYWORDS: tailings dam, stone column, sensitivity analysis, stiffness, stress-strain, cement injections

1 INTRODUÇÃO

A solução de colunas brita tem como objetivo restituir o confinamento aos solos residuais de dolomito, que se encontram em estado fofo na fundação do futuro maciço de alteamento a jusante de uma barragem de rejeitos no Quadrilátero Ferrífero e simultaneamente prover o melhoramento das propriedades mecânicas dos demais solos naturais por meio de substituição de material. Através do deslocamento lateral das partículas sólidas, induzido aquando da execução das colunas de brita e das injeções de alta e/ou baixa mobilidade, impõe-se um deslocamento radial na massa de solo, provocando uma redução do índice de vazios *in situ* e consequentemente a sua densificação.

A necessidade das análises aqui apresentadas advém da ocorrência de variações significativas nos módulos de deformabilidade das colunas injetadas em campo, comprovadas pelos resultados de ensaios realizados em amostras de colunas moldadas em laboratório, com os mesmos traços utilizados no campo. Esses ensaios indicaram módulos de deformabilidade e resistências à compressão não confinada até 4,5 vezes superiores àqueles previstos em projeto, o qual, originalmente considerava colunas de brita tradicionais, sem injeção cimentícia.

Dessa forma, visando avaliar se as referidas alterações nas propriedades do material poderiam vir a comprometer a eficácia e a eficiência da solução originalmente proposta, foram realizadas análises de sensibilidade sobre os modelos numéricos de projeto, considerando os valores médios e extremos do espectro de variação dos parâmetros obtidos na campanha de ensaios de laboratório. Desta forma, estabeleceu-se um programa de análises de tensão-deformação, no qual os parâmetros equivalentes dos solos tratados pelas colunas injetadas, cujo cálculo é baseado na taxa de substituição de material e advém de uma média ponderada dos parâmetros do solo não tratado e das colunas, são alterados proporcionalmente à variação dos parâmetros das colunas, que se alternam entre os valores extremos e o valor médio.

Com esta finalidade, foram elaboradas análises tensão-deformação 2D, nomeadamente, análises de elementos finitos, utilizando o *software* PLAXIS 2D, da seção transversal do talvegue da barragem, que intercepta os solos residuais inconsolidados. Além disso, foi elaborada um modelo 3D, utilizando o *software* PLAXIS 3D, de um trecho da referida seção transversal, com a finalidade de avaliar efeitos específicos que não podem ser observados em análises 2D.

2 PROGRAMA DE ANÁLISES

O programa de análises consiste na exploração de cenários nos quais os valores médios e extremos das propriedades dos materiais, que são variáveis em função da rigidez e da resistência das colunas, são combinados, de forma a simular os efeitos da variabilidade destes parâmetros nas diferentes colunas, ou em diferentes grupos de colunas em campo. Por se tratar de uma análise combinatória das diferentes possibilidades de valores para os parâmetros variáveis, se faz necessária a adoção premissas para controle do número de variáveis, haja vista que o número de análises cresce geometricamente com o número de variáveis.

Com essa finalidade foram adotadas inter-relações fixas, usualmente indicadas na literatura, entre os parâmetros de deformabilidade do constitutivo adotado nas modelagens, o *Hardening Soil* (Schanz; Vermeer e Bonnier, 1999). As inter-relações adotadas são indicadas na Equação 1 (Bentley 2024).

$$E_{50} = E_{\text{oed}} = E_{\text{ur}}/3 \quad (1)$$

Onde:

E_{50} – módulo secante a 50% da tensão de ruptura;

E_{oed} – módulo oedométrico;

E_{ur} – módulo de descarregamento/re-carregamento.

De forma análoga, considerou-se por dedução lógica do círculo de Mohr, a partir da fixação de um ângulo de atrito constante, uma relação direta entre a resistência à compressão uniaxial das colunas e a coesão efetiva do material. Expressa matematicamente pela Equação 2:

$$c' = \frac{q_u}{2} \tan\left(\frac{90-\phi'}{2}\right) \quad (2)$$

Onde:

- c' – coesão efetiva;
- q_u – resistência à compressão não confinada.

O terceiro parâmetro variável nas análises foi o coeficiente de empuxo no repouso (K_0), o qual foi alternado entre o valor natural, estimado pela conhecida fórmula de Jaky (Jaky, 1944), e um valor melhorado que considera o efeito de expansão de cavidade pela execução das colunas. O valor de K_0 , pós implantação das colunas, foi obtido por meio da simulação da implantação das colunas em um modelo axissimétrico de tensão-deformação. Desta forma, pelo princípio da contagem, obteve-se um total de 18 cenários de análise, conforme exposto na Figura 1.

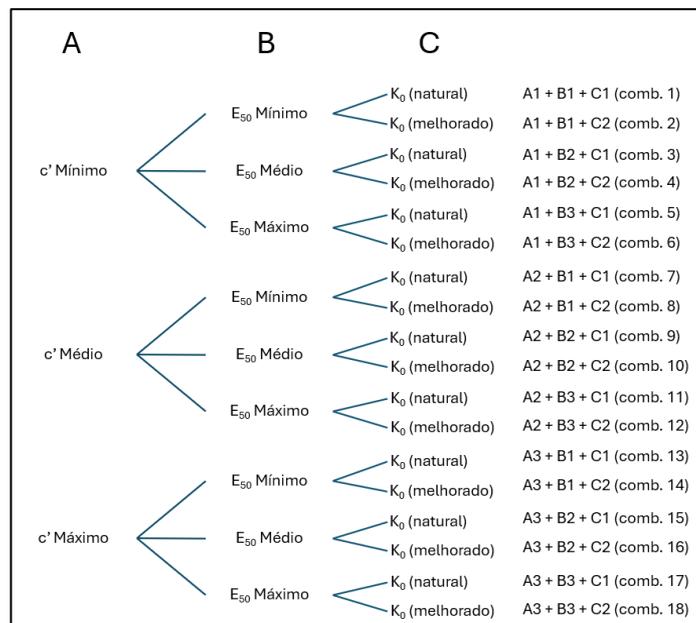


Figura 1. Espaço amostral do programa de análises 2D.

Os ensaios de laboratório demonstraram uma faixa de variação dos módulos secantes, E_{50} , de 91 a 381 MPa, enquanto os valores de q_u variaram de 1,23 a 2,38 MPa. Com esse intervalo e utilizando as taxas de substituição de material calibradas pelo sobreconsumo de brita, obtido em um campo experimental no local da obra, foram calculados os valores médios e extremos dos parâmetros de resistência e deformabilidade dos solos equivalentes tratados pelas colunas, identificados pelos prefixos SEq.

A Figura 2 resume os intervalos de variação dos parâmetros variáveis do programa de análises. Destaca-se que a influência dos parâmetros das colunas nos parâmetros dos SEqs não é linear, pois as taxas de substituição não são constantes entre os diferentes materiais devido à expansão de cavidade.

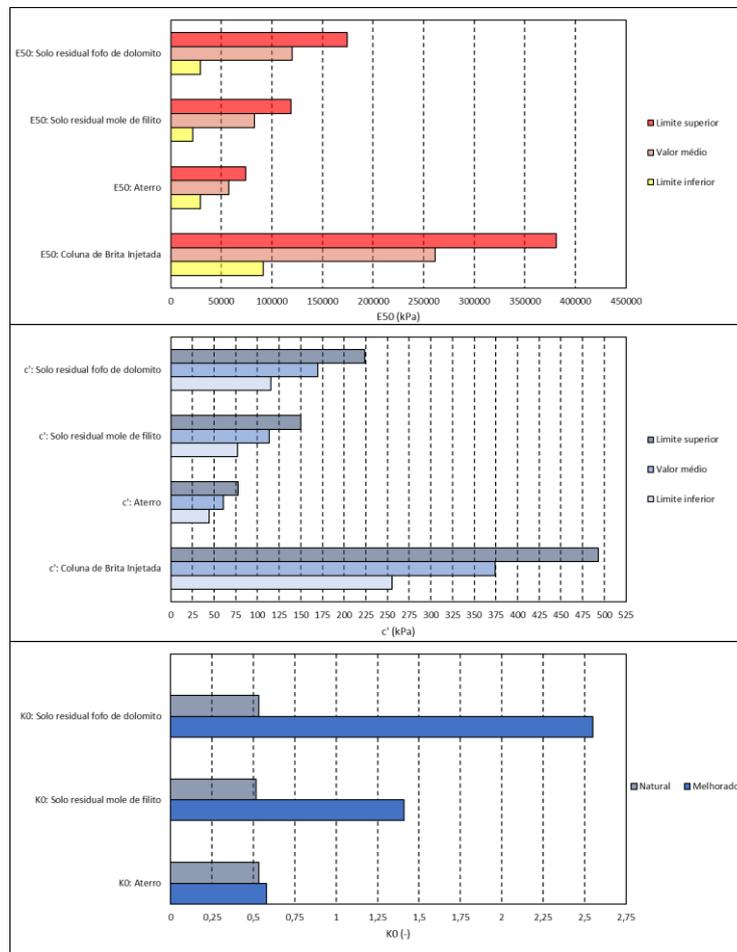


Figura 2. Intervalo de variação dos parâmetros variáveis da análise de sensibilidade.

Os dados brutos resultantes das análises, nomeadamente, a tensão de desvio q , a tensão cisalhante relativa τ_{rel} e os recalques no topo da fundação ρ foram processados por meio de uma rotina de cálculo programada pelos autores.

Diferentemente dos cenários de cálculo simulados nos modelos 2D, que exploram o efeito da variação dos parâmetros dos solos equivalentes, os cenários do programa de análises do modelo 3D buscam avaliar os mecanismos deformacionais e variações no estado de tensões da fundação em cenários nos quais os parâmetros de deformabilidade das colunas, modeladas como elementos discretos, variam de forma homogênea ou heterogênea dentro da malha. Para esta finalidade, fixou-se o intercepto coesivo das colunas discretas em seu valor mínimo e foram atribuídos sobre elas módulos secantes alternados entre o valor médio e seus valores extremos. Guiado por essa premissa basilar, foram construídos modelos com 3 tipos de configuração:

- Arranjo uniforme: todas as colunas discretas assumem um mesmo valor de E_{50} .
- Arranjo caótico: as colunas assumem valores alternados entre o valor médio e os valores extremos, sendo distribuídos de forma puramente aleatória;
- Arranjo estruturado: as colunas assumem valores alternados entre o valor médio e os valores extremos, sendo distribuídos de forma intencional para a simulação de condições desfavoráveis para a obra.

Adicionalmente foi simulado um cenário que considera a quebra da ligação cimentícia de todas as colunas. Neste cenário anulou-se o valor do intercepto coesivo e reduziu-se o módulo secante mínimo em 25%. A Tabela 1 sintetiza os cenários simulados nos modelos 3D.

Tabela 1. Síntese dos cenários de modelagem tridimensional.

Modelo 3D (colunas discretas)			
Cenário	Arranjo	c'	E ₅₀
A	Uniforme	min	E= E _{máx}
B	Uniforme	min	E= E _{mín}
C	Caótico	min	Aleatório ente E _{máx} e E _{mín}
D	Caótico	min	Aleatório ente E _{máx} e E _{mín}
E	Estruturado	min	Estruturado ente E _{máx} e E _{mín}
F	Estruturado	min	Estruturado ente E _{máx} e E _{mín}
G	Estruturado	min	Estruturado ente E _{máx} e E _{mín}
H	Estruturado	min	Estruturado ente E _{máx} e E _{mín}
I	Caótico	min	Aleatório ente E _{máx} e E _{mín}
J	Caótico	min	Aleatório ente E _{máx} e E _{mín}
CBI's plastificadas	Uniforme	zero	E= 75% E _{mín}

3 CONSTRUÇÃO DOS MODELOS

Os modelos desenvolvidos apresentam solos naturais, solos equivalentes (compósito de solos naturais e colunas de brita ou de jet grouting), aterros, rochas em estado natural e rochas injetadas com calda de cimento. São relacionados abaixo os modelos constitutivos utilizados na simulação destes materiais:

- Solos naturais e solos equivalentes tratados com colunas de brita - Modelo *Hardening Soil*.
- Solos reforçados com colunas de Jet Grouting – Modelo Mohr-Coulomb.
- Rochas em estado natural – Modelo Hoek-Brown (Hoek, 2002).
- Rochas injetadas – Modelo Mohr-Coulomb.

Os modelos 2D foram desenvolvidos em estado plano de deformação com N.A. em condição hidrostática de poropressão e a variação da elevação da superfície freática foi sequenciada com as etapas de alteamento do aterro da barragem. No que tange à simulação das etapas construtivas, todos os 18 cenários seguiram a mesma estruturação, variando-se apenas os parâmetros dos materiais tratados pelas colunas de brita. A sequência das fases de alteamento da barragem foi realizada com etapas plásticas de carregamento intercaladas com fases de adensamento de 90% do excesso de poropressão do modelo, efetivamente simulando uma construção lenta e controlada. Após o atingimento da elevação final da crista, simulou-se o enchimento do reservatório até a cota final, finalizando a sequência com uma etapa de dissipação total dos excessos de poropressão residuais.

A Figura 3 apresenta a seção transversal elaborada, com destaque para os 5 materiais tratados pelas colunas de brita. Destaca-se que os materiais SAP-FIL e SAP-DOL não tiveram seus parâmetros modificados nas análises de sensibilidade, por razões de controle de variáveis e por possuírem baixa representatividade para o problema em questão.

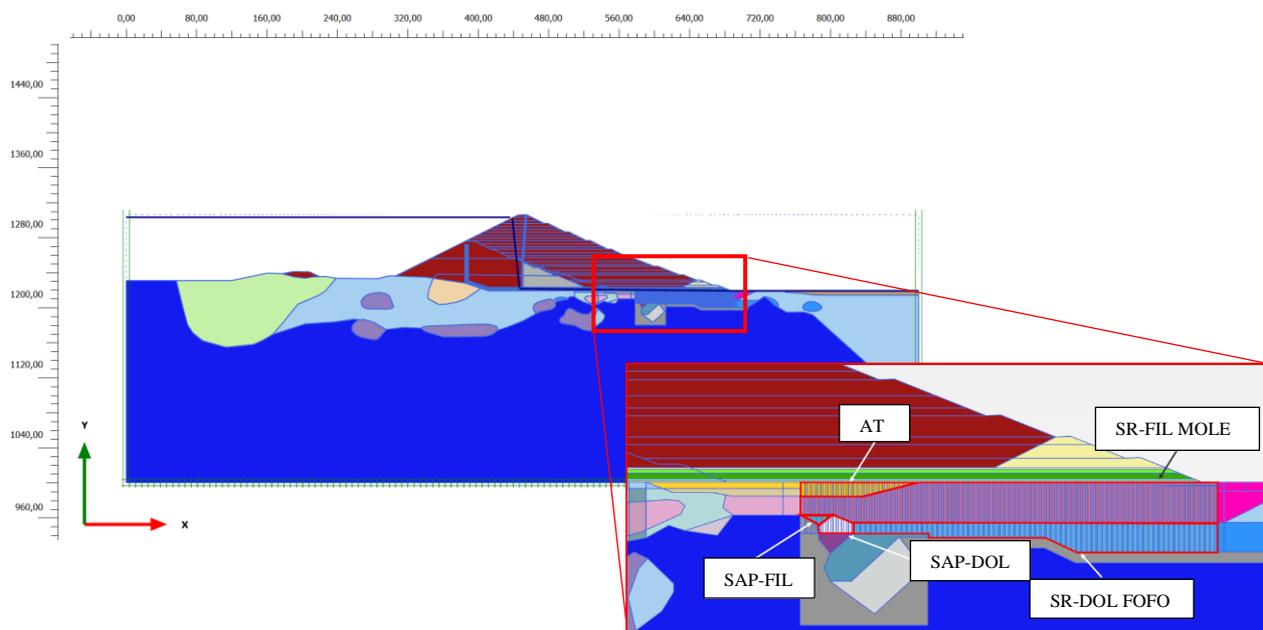


Figura 3. Seção transversal utilizada nos modelos 2D.

Nos modelos 3D, por sua vez, as colunas de brita foram simuladas como elementos discretos, com o objetivo de avaliar fenômenos como, distribuição de tensões entre o solo não tratado e as colunas, punção do tapete drenante da barragem, o qual será assente sobre as colunas, e possíveis recalques diferenciais dentro da malha de colunas em função de variações não uniformes de rigidez entre colunas na malha. Os modelos 3D foram restritos à zona onde foram constatadas as máximas tensões e recalques nos modelos 2D, consistindo em modelos de extrusão, onde a espessura fora do plano 2D abrange 3 linhas de colunas da malha e não há variação nas espessuras das camadas de solo nessa dimensão. A diferença na metodologia de modelagem dos modelos 2D e 3D impede que haja plena convergência dos estados de tensão dos materiais entre modelos, no entanto, para garantir uma aproximação adequada entre os modelos, foram definidas interfaces, nos modelos 2D, nas fronteiras da zona de tratamento que seriam representadas nos modelos 3D e, em seguida, extraiu-se os empuxos nos planos que equivalem a essas fronteiras para importação nos modelos 3D. Esse procedimento simplificado simula o empuxo horizontal exercido pelo aterro ascendente da barragem e a componente resistente do maciço a jusante (fronteiras horizontais). Simulou-se também o peso do maciço de alteamento, atuando na fronteira superior do modelo como uma carga trapezoidal. Essa abordagem teve o objetivo de aproximar o estado de tensões dos modelos, sem a necessidade de modelamento de toda a estrutura.

A Figura 4 exemplifica o processo de “transferência” de carregamentos de fronteira dos modelos 2D para os modelos 3D, enquanto a Figura 5 ilustra a geometria utilizada nos modelos 3D.

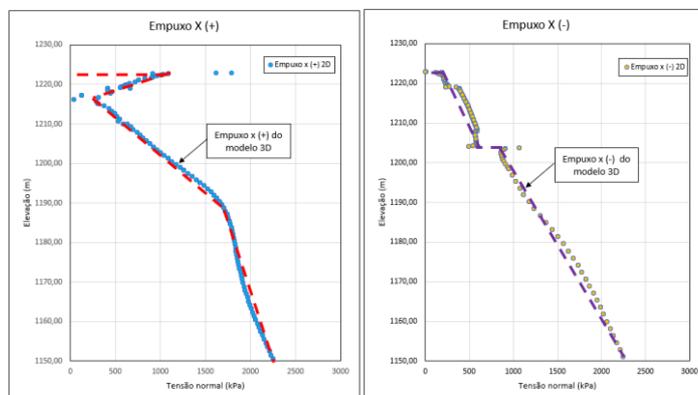


Figura 4. Comparação entre os empuxos e cargas verticais de modelos 2D e 3D.

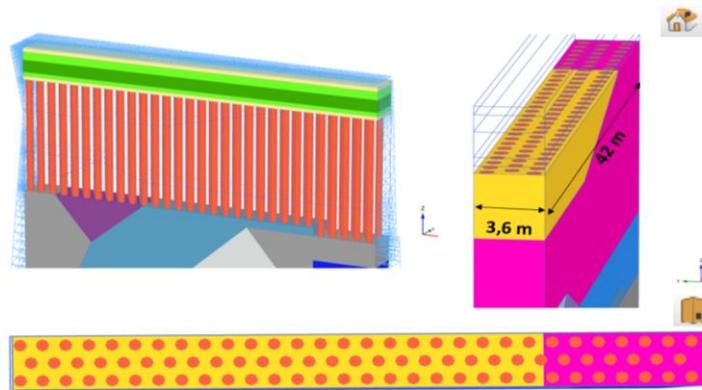


Figura 5. Geometria do modelo 3D de extrusão.

3 RESULTADOS

A Figura 6 apresenta a distribuição das tensões principais maiores em todos os cenários na interface entre o topo das colunas e o terreno natural, onde os quadrados azuis indicam as tensões no solo, os vermelhos as tensões nas colunas, os círculos roxos vazados as tensões no solo no cenário de plastificação de todas as colunas e os círculos roxos preenchidos as tensões nas colunas no cenário de plastificação de todas as colunas.

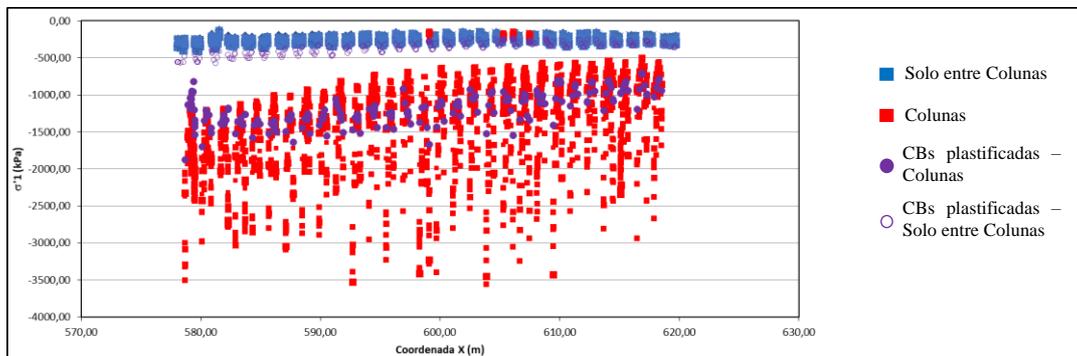


Figura 6. Tensões principais efetivas maiores σ'_1 no solo e nas colunas para todos os cenários de análise.

A Figura 7 apresenta a comparação entre os recalques obtidos no nível do terreno nos cenários simulados nos modelos 2D (linhas pretas) e nos modelos 3D (linhas vermelhas e roxas), onde as linhas roxas indicam o cenário de plastificação de todas as colunas.

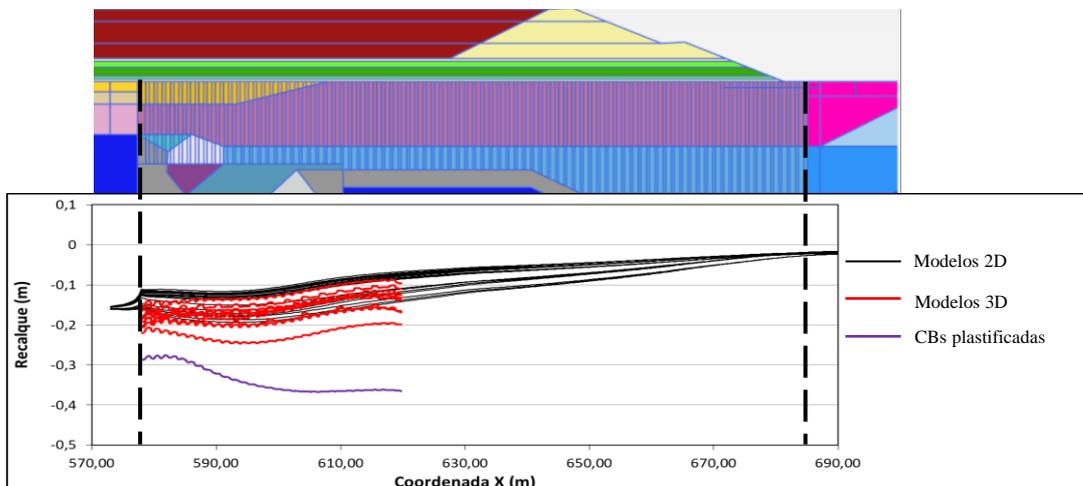


Figura 7. Recalques na zona de tratamento – comparação modelos 2D vs modelos 3D.

4 CONCLUSÕES

Os diversos modelos de tensão-deformação desenvolvidos permitiram traçar um panorama geral da influência que as colunas mais rígidas podem ter nos recalques totais e diferenciais esperados. Os cenários desenvolvidos nos modelos 2D não indicaram a ocorrência de pontos de plastificação nos clusters que simulam o solo tratado, tendo sido obtidas tensões cisalhantes máximas, no pior dos cenários, de 96% de τ_{\max} .

A inclusão dos modelos 3D no programa de análises trouxe luz para um fenômeno não reproduzível nos modelos bidimensionais, que é a plastificação progressiva das colunas discretas e do solo no entorno delas, particularmente intensificado nos cenários nos quais há contraste significativo de rigidez entre colunas individuais próximas. Nestes cenários, a concentração de tensões nas colunas mais rígidas promove sua plastificação e consequente redistribuição de tensões para o solo circundante e colunas próximas, efetivamente criando zonas de plastificação, onde espera-se que a resistência ao cisalhamento do compósito seja reduzida e ocorram maiores recalques. No entanto, mesmo nos cenários mais críticos, quando, por exemplo, uma coluna de rigidez máxima encontra-se circundada por colunas com rigidez mínima, o confinamento radial impede a formação de bandas de cisalhamento mais expressivas. O fato de os modelos 3D terem apresentado mais pontos de plastificação quando comparados aos modelos 2D, é também justificado pelo fato das colunas terem sido modeladas com seu diâmetro teórico nos modelos 3D, efetivamente reduzindo as taxas de substituição de material em relação aos modelos análogos bidimensionais. O efeito da menor taxa de substituição dos modelos 3D torna-se evidente pela comparação das curvas de recalque obtidas nos modelos 2D e 3D, que demonstra um claro deslocamento vertical negativo das curvas dos modelos 3D, o que vai no sentido contrário de comparações usuais entre modelos 2D e 3D, que tendem a indicar deslocamentos inferiores nos modelos 3D.

O cenário que representa o que seria uma consequência extrema do fenômeno de plastificação das colunas injetadas, o qual considera todas as colunas com rigidez 25% inferior à mínima e sem coesão, demonstra que os recalques totais podem atingir valores de até 37 cm, com distorções angulares dentro da área de tratamento de até 1:180.

Os resultados dos modelos 3D demonstraram de forma satisfatória que a possibilidade de puncionamento das colunas através do tapete drenante não é relevante, uma vez que mesmo no cenário mais propício para ocorrência do fenômeno (todas as colunas com máxima rigidez), a ocorrência de pontos de plastificação no tapete drenante foi praticamente nula. Além disso, os recalques diferenciais dentro da malha (ondulações) ficarem restritos ao primeiro metro de aterro acima do topo das colunas, não havendo propagação através do tapete.

AGRADECIMENTOS

A JETsj agradece a autorização da DF+ Engenharia para a publicação do presente artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2017). NBR 8522. *Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão*
- Jaky, J. (1944). *The Coefficient of Earth Pressure at Rest*. Journal of Society of Hungarian Architects and Engineers, Budapest, Hungary, pp. 355-358
- Hoek, Evert et al., *Hoek-Brown Failure Criterion*. NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002, 1, 267-273.
- Schanz, T., Vermeer, P. A. & Bonnier P. G. (1999). *Formulation & Verification of the Hardening Soil Model*. Beyond 2000 in Computational Geotechnics. First Edition.
- Bentley (2024). PLAXIS 2D 2024.1 : 3 - Material Models Manual. Disponível em <https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/plaxis-soilvisionwiki/46137/manuals---plaxis>, acessado em 21/03/2024