

Análise Comparativa entre Técnicas de Modelagem para Representar a Condição Inicial de Estruturas Suscetíveis a Liquefação com Modelo Norsand

Bernardo Silva

Engenheiro Geotécnico, Tetra Tech South America, Brazil, Bernardo.Silva@tetratech.com

Renan Campos

Engenheiro Civil, Tetra Tech South America, Brazil, Renan.Campos@tetratech.com

Hernán Carvajal

Engenheiro Geotécnico, Tetra Tech South America, Brazil, Hernan.Carvajal@tetratech.com

Pablo Gonçalves

Engenheiro Geotécnico, Tetra Tech South America, Brazil, Pablo.Gonçalves@tetratech.com

Christine Alfradique

Engenheira Geotécnica, Tetra Tech South America, Brazil, Christine.Alfradique@tetratech.com

RESUMO: O modelo constitutivo Norsand é amplamente empregado em análises de tensão x deformação para avaliar o efeito de obras de escavação, reforço e adequações em barragens suscetíveis à ruptura por liquefação. Essa abordagem é crucial para determinar a taxa de avanço das obras, e evitar gatilhos inerentes ao fenômeno. Após definir os parâmetros geotécnicos, é necessário escolher um método para modelar numericamente a condição da estrutura antes das intervenções. Uma prática recomendada é simular os alteamentos do barramento e do reservatório, permitindo que o modelo numérico represente variações nos parâmetros de estado e campo de tensões *in situ* em cada região da estrutura. Essa simulação pode ser realizada apenas com o modelo Norsand ou combinando-o com modelos constitutivos mais simples capazes de para representar as sucessivas camadas de alteamento. Este artigo apresenta um estudo de caso teórico que compara o impacto de obras de reforço e escavação em uma barragem, utilizando diferentes abordagens de modelagem da condição inicial *in situ*. São apresentadas as variações mais relevantes em termos de parâmetro de estado, deslocamentos e deformações, com redução significativa do tempo computacional a partir da utilização intercalada de modelo Norsand e modelo simplificado.

PALAVRAS-CHAVE: Liquefação, Norsand, Barragens, Tensão, Deformação.

ABSTRACT: The Norsand model is increasingly employed in stress-strain analyses to assess the impact of excavation, reinforcement, and adjustments on dams prone to liquefaction-induced failure. It helps determine the advancement rate of works to prevent liquefaction triggers. After defining geotechnical parameters, it's crucial to numerically model the structure's condition pre-intervention. Simulating dam and impoundment raisings aids in presenting variable parameters and stress fields. This can be achieved solely with the Norsand model or by interleaving layers of raising between simpler constitutive models. This article presents a theoretical case study comparing the impact of using different modeling approaches for the initial *in situ* condition in reinforcement and excavation works in a dam. The most relevant variations in terms of state parameters, displacements, and deformations are presented, with a significant reduction in computational time achieved by using the Norsand model interspersed with a simplified model.

KEYWORDS: Liquefaction, Norsand, Dams, Stress-Strain

1 INTRODUÇÃO

A ruptura da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais, em 2015, ficou marcada como uma das maiores tragédias ambientais da história brasileira. Além das consequências diretas da ruptura, o evento destacou o preocupante fenômeno da liquefação do solo e a importância das análises de tensão x deformação para prever e mitigar desastres desse tipo.

A liquefação é um fenômeno geotécnico no qual solos saturados, pouco coesivos e com comportamento contrátil perdem de forma abrupta parte da sua resistência e rigidez por um curto intervalo de tempo e se comportam como um líquido viscoso. A manifestação deste fenômeno ocorre devido ao excesso de poropressão em condições não drenadas engatilhadas sob ação de carregamentos monotônicos (liquefação estática) ou carregamentos cíclicos (liquefação dinâmica). Independentemente da origem da tipologia do gatilho, a liquefação pode resultar em colapsos de estruturas, como barragens, pontes e edifícios, levando a desastres de proporções devastadoras.

Para compreender e prever o comportamento do solo diante desses eventos extremos, as análises de tensão x deformação desempenham um papel crucial. Essas análises permitem avaliar como o solo responderá aos diferentes tipos de carregamentos e/ou descarregamentos fornecendo informações vitais para o projeto e a construção de infraestruturas seguras.

Um dos modelos amplamente utilizados para simular o comportamento de solos suscetíveis a liquefação é o modelo Norsand. Desenvolvido para representar as características complexas de resistência e deformação do solo, o modelo Norsand permite uma análise precisa e detalhada das condições de carga e sua influência na estabilidade do solo. Isso é essencial para identificar potenciais pontos de fragilidade e prever comportamentos adversos, como a liquefação estática.

O modelo constitutivo Norsand pode ser aplicado para a definição da taxa de avanço de obras (carregamento ou descarregamento), com o objetivo de evitar gatilhos de liquefação. Com esse intuito, após extensa campanha de investigação para caracterização dos materiais presentes, elaboração do modelo geológico-geotécnico e definição de parâmetros, é necessária a definição de um método para a representação no modelo numérico, da condição atual da estrutura (antes de qualquer intervenção).

A definição da condição atual da estrutura é importante para que seja possível realizar, de forma mais precisa, a previsão dos impactos das obras de escavação e/ou reforço no desempenho da estrutura, em termos de deslocamentos, excessos de poropressão, deformações cisalhantes, dentre outras informações relevantes que podem ser obtidas pelas análises de tensão x deformação. A partir dos valores iniciais obtidos para a situação *in situ*, os parâmetros geotécnicos a serem aplicados durante a modelagem da execução das obras são calibrados, visando maximizar a aderência à condição real em campo.

Dentre os métodos possíveis para se modelar a condição atual da estrutura, constitui-se uma boa prática a simulação dos alteamentos do barramento e de seu reservatório. Desta forma, possibilita-se que o modelo numérico apresente parâmetros de estado (Ψ) e coeficientes de empuxo em repouso (k_0) variáveis em cada região da estrutura, ou seja, uma abordagem contrária à definição de valores de k_0 e Ψ fixos, normalmente obtidos pontualmente a partir de ensaios de campo e que possuem a limitação de não conseguirem representar a variabilidade desses parâmetros observada em estruturas geotécnicas. Essa prática, acoplada com as informações construtivas ao longo do tempo, resulta em uma modelagem mais confiável, dada a notória dificuldade de obtenção do valor de k_0 em campo, o que limita a eficácia da utilização de valores únicos para os materiais do barramento.

A simulação dos alteamentos pode ser realizada apenas com a utilização do modelo Norsand ou por meio da intercalação das sucessivas camadas de alteamento entre modelos constitutivos mais simples e o Norsand. Isto se deve ao fato de que a aplicação exclusiva do Norsand durante as etapas de alteamento pode apresentar diversos problemas de instabilidade numérica no modelo. Dessa forma, o presente artigo busca apresentar um estudo de caso teórico no qual se compara a estimativa do impacto de obras de reforço e escavação em uma barragem por meio de diferentes artifícios técnicos de modelagem da condição inicial *in situ*.

2 METODOLOGIA

A simulação da condição inicial *in situ* de uma estrutura pode apresentar diferenças significativas a partir dos métodos utilizados para a representação dos alteamentos. Dessa forma, a condição inicial de uma barragem alteada a montante foi simulada a partir da intercalação entre um modelo constitutivo mais simples (*Hardening Soil Model* – HSM, Schanz *et al.*, 1999) e o modelo *Norsand* (Jefferies & Been, 2015), conforme prática comum apresentada pelo Itasca Consulting Group (2022) com o objetivo de geração do estado de tensões inicial *in situ* e referenciada por estudo realizado por Cheng & Jefferies (2020), e a partir da utilização exclusiva do modelo *Norsand* durante as fases de alteamento.

Para a realização das análises de tensão x deformação foi utilizado o *software* comercial Plaxis 2D Ultimate versão 2023.1.0.136 da Bentley Systems. Todas as condições de contorno foram mantidas para as duas simulações e foi seguido o mesmo faseamento das obras de reforço. Realizou-se uma análise de deformação e excesso de poropressão dependente do tempo (*Consolidation Analysis*), com simulação dos alteamentos da estrutura em 50 dias por camada.

Além disso, foram considerados 2 dias por camada de escavação e reforço e 3 dias por camada de construção do dique inicial, com o intuito de simular uma condição de construção rápida. Cada camada de reforço possui 1,5 metros de espessura e cada camada de rejeito 2,5 m. As poropressões estáticas foram calculadas por meio de linha freática global, desconsiderando sucção nas análises. Ao todo, foram representadas 21 etapas de reforço e 4 etapas de escavação para cada simulação. Adicionalmente, a estrutura avaliada possui 18 camadas de rejeito e foram necessárias 14 etapas para a simulação da construção do dique inicial e dos seus alteamentos.

Em relação a malha de elementos finitos, o maior refinamento nas regiões de interesse foi realizado nas regiões de interesse do estudo (reservatório em rejeito e alteamentos). A malha foi tratada de forma a garantir qualidade de no mínimo 30% para todos os elementos, segundo ferramenta do próprio *software*. A área dos elementos em regiões mais próximas ao reforço apresentou valores inferiores a 1 metro e em regiões mais afastadas do reservatório valores inferiores a 2,5 metros.

Utilizou-se o modelo Mohr-Coulomb para os litotipos de areia, aterro do dique de partida e alteamentos e enrocamentos. Para o saprólito de filito foi adotado o modelo *Hardening Soil Model* (Schanz *et al.*, 1999). Em relação ao rejeito do reservatório, utilizou-se o modelo *Norsand* e, quando necessário intercalações, optou-se pelo modelo HSM quando necessário realizar as intercalações. Os parâmetros geotécnicos utilizados foram definidos com base na literatura e na experiência prévia dos autores com litotipos semelhantes.

Os valores máximos de deslocamentos e deformações cisalhantes pós-obras de reforço e escavação serão apresentados na forma de análise comparativa entre as duas simulações. Também serão apresentadas imagens gráficas dos principais resultados do parâmetro de estado e da razão de resistência normalizada (N/M_0) ao final da simulação de alteamentos (pré obras). Por fim, são apresentadas discussões acerca dos resultados para avaliar os impactos entre as simulações da condição inicial *in situ* do barramento pelos dois métodos mencionados.

3 ESTUDO DE CASO

3.1 Modelo

Para o presente estudo adotou-se uma seção simplificada de projeto de uma barragem de rejeitos arenosos com alteamentos a montante e com fundação em saprólito de filito. Os alteamentos e dique inicial foram representados por um material silto-argiloso de baixa permeabilidade. O sistema de drenagem interna é representado por tapetes drenantes e um filtro vertical.

O barramento apresenta 35,9 metros de altura antes das obras de escavação e 38,5 metros após. A inclinação global da estrutura pré-obras é de 1V:2,6H e de 1V:2H entre bermas. O reforço em enrocamento apresenta 30,2 metros de altura, inclinação global de 1V:3,5H e inclinação entre bermas de 1V:2H. A etapa de escavação envolveu a remoção de 4,1 metros de material no pé da estrutura para nivelamento do terreno.

Os drenos foram dimensionados com 1,2 metros de espessura. Por se tratar de uma seção simplificada, não foram representadas as camadas de transições entre os materiais que compõem o sistema de drenagem.

A fundação do modelo apresenta cerca de 56 metros e o distanciamento do último alteamento para a borda esquerda do modelo é de aproximadamente 100 metros, distâncias consideradas suficientes para evitar problemas de borda no modelo. A figura 1 apresenta a seção geológico geotécnica e a linha freática global adotada no estudo desenvolvido. A figura 2 apresenta imagens com a qualidade e área da malha de elementos finitos do modelo.

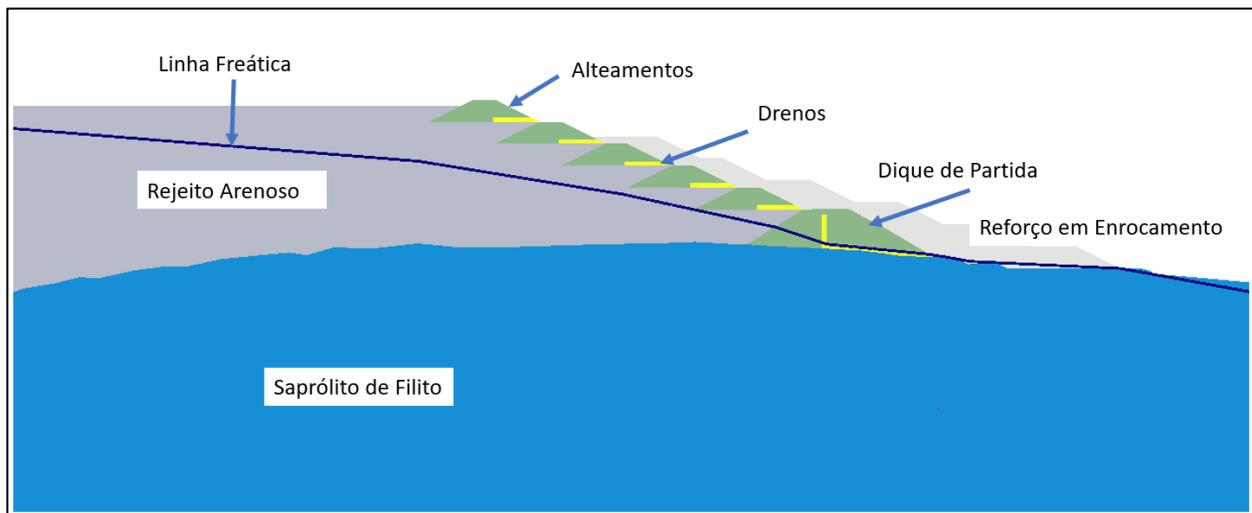


Figura 1. Seção Geológico-Geotécnica e Linha Freática utilizada como para o estudo.

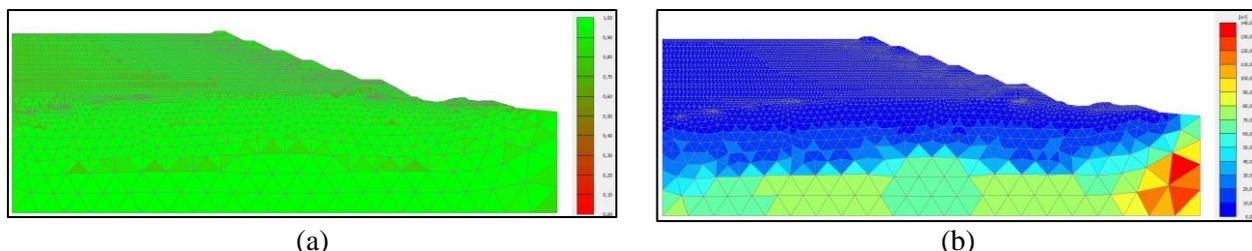


Figura 2. (a) Qualidade da malha de elementos finitos; (b) Área dos elementos da malha.

3.2 Parâmetros

Para a realização dos estudos de tensão x deformação é necessário a definição de parâmetros geotécnicos e hidráulicos para todos os materiais presentes na seção geológico-geotécnica do modelo. Para isso, foram utilizados valores de literatura e estimados com base na experiência do autor. Entre a tabela 1 e tabela 4 são apresentados os valores adotados.

Tabela 1. Parâmetros Adotados – Modelo de Mohr-Coulomb.

Litotipo	c' (kPa)	Φ' (°)	E' (MPa)	ν
Areia (Dreno)	1	32	20	0,30
Enrocamento	1	35	80	0,30
Alteamento e Dique de Partida	20	30	22	0,30

Tabela 2. Parâmetros Adotados – Modelo de HSM.

Litotipo	c' (kPa)	Φ' (°)	E_{50}^{ref} (MPa)	E_{oed}^{ref} (MPa)	E_{ur}^{ref} (MPa)	ν_{ur}
Saprólito de Filito	22	33	10	10	30	0,20
Rejeito Arenoso	0	35	12	12	36	0,20

Tabela 3. Parâmetros Adotados – Norsand.

Litotipo	G_{ref} (MPa)	P_{ref} (kPa)	n_G	v	Ca	Cb	Cc	M_{tc}	N	X_{tc}	H_0	H_ψ	R	Ψ_0
Rejeito Arenoso	5	100	20	0,3	1,29	0,34	0,11	1,38	0,27	6	160	1037	1,1	0,10

Tabela 4. Parâmetros Adotados – Permeabilidade.

Litotipo	K_v (m/s)	k_v / k_h
Areia (Dreno)	1,00E-04	1
Enrocamento	1,00E-06	1
Alteamento e Dique de Partida	1,00E-03	1
Rejeito Arenoso	5,00E-05	1
Saprólito de Filito	5,00E-06	1

Para a estimativa do módulo de deformabilidade da areia foram considerados os valores típicos apresentado por Budhu (2011) para areia fofa e média. Em relação ao enrocamento, foi utilizado como referência o conjunto de valores típicos apresentados por Obrzud & Truty (2018) para material granular de compacidade fofa a média.

O campo de tensões *in situ* inicial foi calculado pelo *software* Plaxis 2D com base no método denominado “ k_0 procedure”. Nesse método, o valor de k_0 é calculado com base na equação empírica de Jaky (1944), apresentada na equação 1.

$$k_0^{nc} = 1 - \text{sen}\varphi \quad (1)$$

O valor de coesão de 1 kPa para o enrocamento e areia (dreno) foi um artifício adotado com o objetivo de evitar rupturas localizadas e superficiais nos dois litotipos. A adoção desse valor não traz impactos significativos para os estudos realizados e considerar a escala da estrutura analisada.

De modo geral, os parâmetros geotécnicos do modelo *Norsand* (Jefferies, 1993 e Jefferies & Been, 2015), foram obtidos com base no apêndice E do relatório do painel de especialistas sobre as causas técnicas do rompimento da Barragem I do Feijão (Robertson et. al, 2019). Os parâmetros G_{ref} , R, v e Ψ_0 foram definidos com base na experiência do autor com materiais semelhantes. Os demais parâmetros foram adotados a partir de ensaios de caracterização física, triaxiais e de permeabilidade em materiais semelhantes.

3.3 Resultados

A tabela 5 apresenta os valores máximos obtidos nas duas simulações realizadas. A figura 3 apresenta imagem de deslocamento total para a simulação de intercalação entre *Norsand* e HSM com destaque para as regiões com maiores deslocamentos e deformações em ambas simulações.

Tabela 5. Valores máximos obtidos no rejeito nas análises de tensão x deformação – Pós-Reforço.

Parâmetro	<i>Norsand</i>	<i>Norsand</i> intercalado com HSM
Deslocamento Total	18,20 cm	18,28 cm
Deslocamento Vertical	17,13 cm	17,21 cm
Deslocamento Horizontal	6,73 cm	6,77 cm
Deformação Cisalhante	2,5%	3,4%

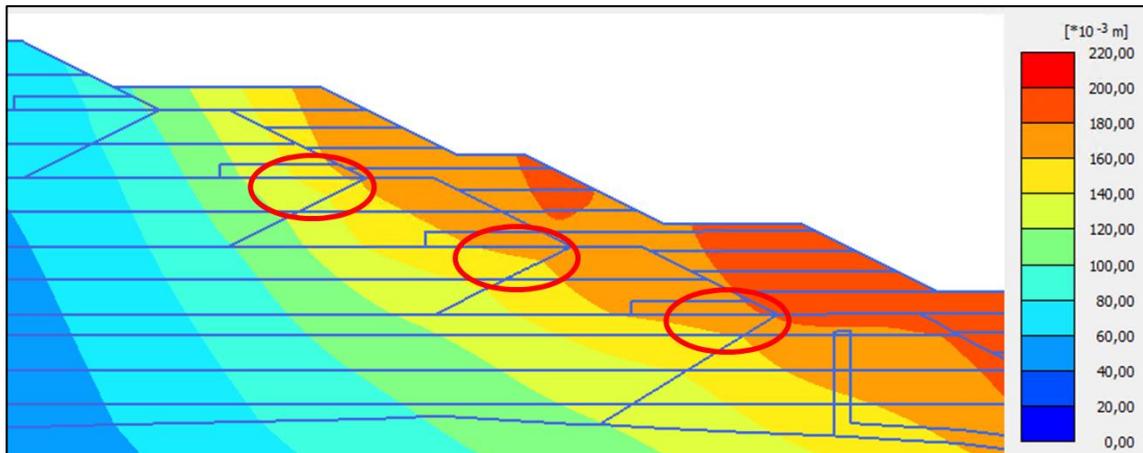


Figura 3. Deslocamento Total – Pós obra de reforço e escavação – Simulação alternando *Norsand* e HSM – Destaque para regiões no qual foram identificados maiores valores de deslocamento e deformação no rejeito.

Entre a figura 4 e figura 7 são apresentadas imagens gráficas da distribuição de parâmetro de estado e da razão de resistência não normalizada no rejeito arenoso. Para facilitar comparação, foi mantida a mesma escala da legenda para cada simulação, ou seja, a legenda de parâmetro de estado varia entre 0,02 e 0,20 e da razão de resistência normalizada entre 0,00 e 1,10.

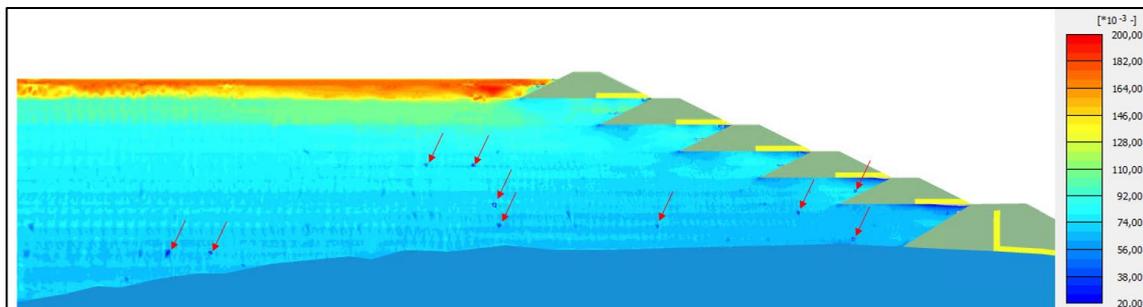


Figura 4. Parâmetro de Estado – Pré obra de reforço e escavação – Simulação apenas com *Norsand* – Destaque em vermelho para regiões pontuais com valores discrepantes de Ψ .

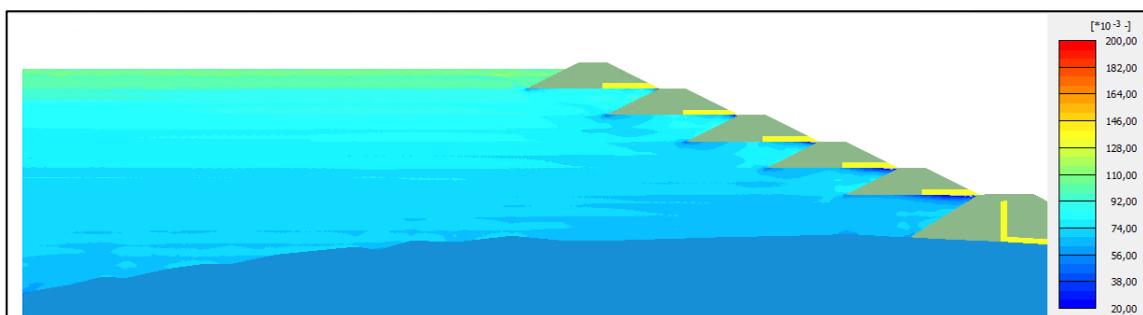


Figura 5. Parâmetro de Estado – Pré obra de reforço e escavação – Simulação alternando *Norsand* e HSM.

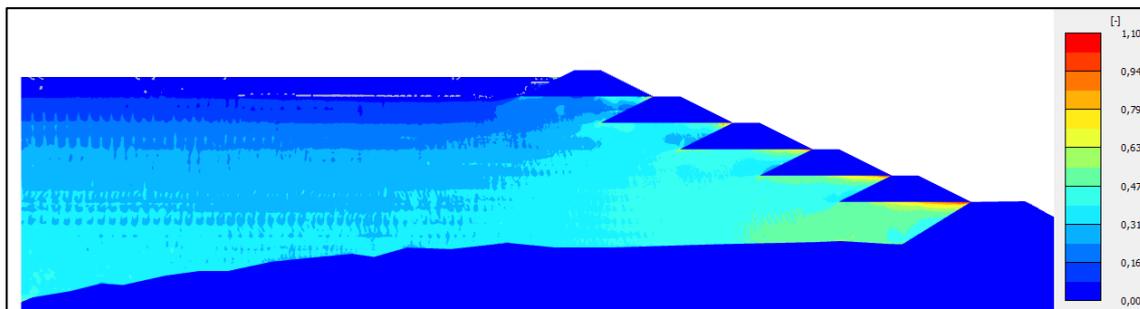


Figura 6. Razão de Resistência Normalizada (N/M_{θ}) – Pré obra de reforço e escavação – Simulação apenas com *Norsand*.

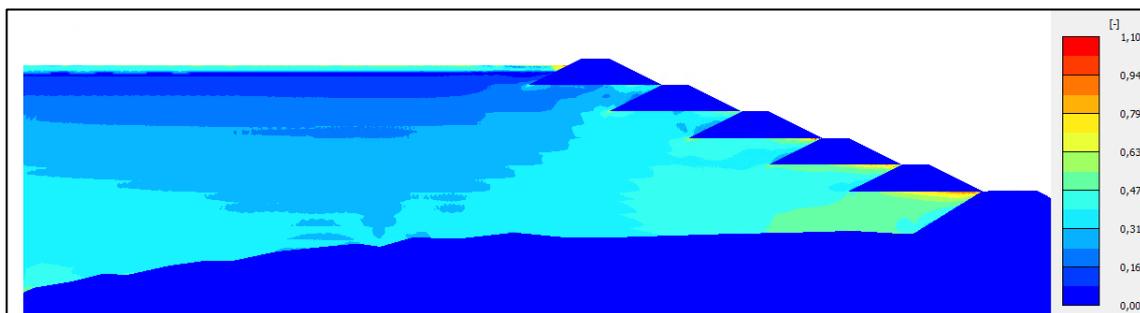


Figura 7. Razão de Resistência Normalizada (N/M_{θ}) – Pré obra de reforço e escavação – Simulação alternando *Norsand* e HSM.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados dos deslocamentos apresentados pela estrutura após as obras de reforço sugerem que não houve diferença significativa na previsão de recalques e deslocamentos horizontais para as duas simulações, com diferenças inferiores a 0,5 cm, dentro da margem de erro esperada para o porte da estrutura avaliada.

Em relação à deformação cisalhante, foi possível observar uma diferença na ordem de 1%, que pode ser considerada significativa para materiais que atingem resistência de pico a baixas deformações. No entanto, conforme evidenciado na figura 3, as regiões que apresentaram maiores valores de deslocamentos e deformações são muito localizadas, ocorrendo no contato entre os alteamentos e o reservatório em rejeito em profundidades mais rasas, ou seja, em áreas de menor tensão efetiva.

As figuras 4 e 5 ilustram a distribuição do parâmetro de estado do rejeito em profundidade e em diferentes regiões do barramento. É possível observar que a distribuição do parâmetro de estado (Ψ) pelas duas simulações é semelhante, com exceção de regiões mais superficiais do reservatório, onde a simulação apenas com o modelo *Norsand* apresentou valores de Ψ até 0,20. Além disso, são identificáveis pontos isolados no interior do reservatório na figura 4 com valores discrepantes do esperado (valores próximos ou inferiores a 0,02 em regiões com valores acima de 0,06, por exemplo), evidenciando a instabilidade do modelo durante as fases de preenchimento do reservatório, o que aumenta consideravelmente o tempo de processamento.

As figuras 6 e 7 mostram os valores de N/M_{θ} no reservatório para as duas análises. Esse parâmetro é importante na engenharia e na geotecnia para identificar regiões de maior vulnerabilidade à liquefação e perda de resistência durante eventos sísmicos, sendo que valores mais próximos a 1 indicam maior vulnerabilidade. Observa-se que, para ambas as simulações, a distribuição de valores no reservatório foi muito semelhante, com exceção de regiões mais superficiais do reservatório que não têm impacto para o estudo desenvolvido.

Com base nas análises apresentadas, é possível perceber que não houve diferenças significativas nos resultados entre as duas simulações realizadas. Entretanto, é importante destacar que o esforço computacional e o tempo necessário para processamento dos estudos realizados apenas com a utilização do rejeito com parâmetros *Norsand* foram consideravelmente superiores e do aparecimento de inconsistências no valor de Ψ em alguns pontos da malha. Dessa forma, para estudos semelhantes, sugere-se a utilização do artifício de

modelagem apresentado no manual do software FLAC3D pelo Itasca Consulting Group (2022), no qual modelos constitutivos mais simples são utilizados para gerar o estado de tensões inicial do modelo.

Os parâmetros utilizados foram obtidos a partir de ensaios de caracterização física, triaxiais e de permeabilidade em materiais semelhantes. Ressalta-se que é necessária uma extensa campanha de investigação para a definição de todos os parâmetros necessários para a realização de um estudo de tensão x deformação confiável. O presente estudo teve como foco avaliar as diferenças entre a simulação do preenchimento do reservatório e alteamento da estrutura por dois métodos de modelagem distintos, mantendo-se todos parâmetros, premissas e critérios iguais

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Budhu, M. (2011). *Physical soil state and soil classification*. Soil mechanics and foundations, 65-66.

Cheng, Z., Jefferies, M. (2020). *Implementation and Verification of NorSand Model in General 3D Framework*. In: Geo-Congress. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, 2020. p. 10-19.

Itasca Software (2023). *FLAC3D Program Guide*. Disponível em: <https://docs.itascacg.com/flac3d700/common/models/norsand/doc/modelnorsand.html>. Acesso em: 22 mar. 2024.

Jaky, J. (1944). *The Coefficient of Earth Pressure*. Rest. Journal of Society of Hungarian Architects and Engineers, Budapest, Hungary. 355-358.

Jefferies, M., Been, K. (2015). *Soil liquefaction: a critical state approach*. CRC press.

Jefferies, M. (1993) *NorSand: a simple critical state model for sand*. Géotechnique, v. 43, n. 1, p. 91-103.

Obrzud, R. F., Truty, A. (2018). *The Hardening Soil Model-a practical guidebook*. Z Soil. PC 100701 report. Switzerland: Zaca Service Ltd.

Robertson, P. K., Melo, L., Williams, D. J., & Wilson, G. W. (2019). *Relatório do Painel de Especialistas Sobre as Causas Técnicas do Rompimento da Barragem I do Córrego do Feijão*. Disponível em: <<http://www.b1technicalinvestigation.com/pt/report.html>>. Acesso em 15 fev. 2024.

Schanz, T., Vermeer, P. A., Bonnier, P. G. (1999). *The hardening-soil model: Formulation and verification*. In R.B.J. Brinkgreve, Beyond 2000 in Computational Geotechnics, Balkema, Rotterdam. 281–290.