

Calibração do Modelo NorSand Para O Rejeito De Uma Barragem De Mineração De Ferro

Luísa de Andrade Araújo

Engenheira Civil, DAM Projetos de Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, luisaa.a@hotmail.com

Thiago Cruz Bretas

Engenheira Civil, Tbetas, Belo Horizonte, Brasil, tbretas@tbretas.com

Marcelle Murta Brugnara

Engenheira Civil, DAM Projetos de Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, marcellebrugnara@gmail.com

Rafael Mendonça Carvalhais

Engenheira Civil, DAM Projetos de Engenharia, Belo Horizonte, Brasil, rmcarvalhais@gmail.com

Frank Marcos da Silva Pereira

Engenheiro Civil, VALE, Belo Horizonte, Brasil, frank.pereira@vale.com

RESUMO: O modelo constitutivo NorSand considera o efeito do índice de vazios no comportamento do solo, sendo capaz de representar a perda de resistência do material ao se contrair (strain-softening). Tal característica se faz relevante na avaliação do comportamento de rejeitos arenosos, uma vez que consegue analisar a liquefação deste material. Este estudo contempla a definição dos parâmetros do modelo NorSand para o rejeito de uma barragem localizada no Quadrilátero Ferrífero, considerando a análise de 21 ensaios triaxiais e 27 ensaios CPTUs, realizados neste material. Com os resultados dos ensaios triaxiais, foi realizado um refinamento daqueles que atingiram o estado crítico, de forma a possibilitar a determinação da linha de estados críticos (LEC) deste material. A análise dos ensaios CPTUs contribuiu para a calibração do parâmetro de estado do rejeito e susceptibilidade à liquefação, avaliando a coerência com os ensaios triaxiais. A partir destes dados, foi realizada a calibração individual de cada corpo de prova do ensaio triaxiais por meio de uma planilha de referência e, com o intervalo de valores encontrados, foi realizada a calibração coletiva do rejeito, por meio do software RSDData, de forma a se obter parâmetros NorSand que representem o material como um todo. Essa calibração teve como referência o comportamento menos resistente do rejeito (limites inferiores) e representou bem a perda de resistência do material conforme o esperado. A calibração realizada foi capaz de representar, de maneira satisfatória, as trajetórias de tensões indicadas pelos ensaios triaxiais realizados.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito, NorSand, Índice de Vazios, Calibração.

ABSTRACT:

The NorSand constitutive model considers the effect of the void index on the behavior of the soil, being able to represent the material's loss of resistance when contracting (strain-softening). This characteristic is relevant in evaluating the behavior of sandy tailings, as it can analyze the liquefaction of this material. This study includes the definition of the parameters of the NorSand model for tailings from a dam located in the Iron Quadrangle, considering the analysis of 21 triaxial tests and 27 CPTUs tests, carried out on this material. With the results of the triaxial tests, a refinement of those that reached the critical state was carried out, in order to enable the determination of the critical state locus (CSL) of this material. The analysis of the CPTUs tests contributed to the calibration of the state parameter and the susceptibility to liquefaction, evaluating coherence with the triaxial tests. From these data, individual calibration of each specimen of the triaxial tests was carried out using a reference spreadsheet and, with the range of values found, the set of tests was calibrated using the RSDData software, in order to obtain NorSand parameters that represent the material as a whole. This calibration took as a reference the less resistant behavior of the waste (lower limits) and represented the material's loss of resistance as expected. The calibration carried out was capable of satisfactorily representing the stress trajectories indicated by the triaxial tests carried out.

KEYWORDS: Tailings, NorSand, Void Index, Calibration, Critical State

1 INTRODUÇÃO

O reservatório da barragem é constituído por rejeitos gerados a partir do beneficiamento de rochas de itabirito hematíticas, ao longo de aproximadamente 20 anos de operação. O rejeito é caracterizado por uma granulometria que varia de areia fina a média siltosa, de cor marrom escura a preta e de compactidade fofa, cujos valores médios de NSPT ficaram entre os 2 e 4 golpes, comumente apresentam altos teores de minério de ferro.

O modelo constitutivo que melhor representa o comportamento do rejeito é o NorSand. Para isso, foram interpretados todos os ensaios de laboratório e campo disponíveis para este material. A partir deste modelo é possível determinar o potencial de liquefação dos rejeitos durante as etapas de descaracterização da barragem, considerando o comportamento de perda de resistência pós pico (strain-softening). Em geral, a liquefação estática ocorre em materiais granulares fofos sob condições não drenadas no cisalhamento. Durante esse carregamento, a poropressão aumenta e a tensão efetiva diminui até atingir valores residuais ao mesmo tempo em que as deformações aumentam constantemente (Sternik, 2014).

A teoria do estado crítico envolve mais do que independência das propriedades relacionadas à densidade. Os modelos descritivos são intrinsecamente ajustados à curva e ancorados nos dados dos ensaios, que podem ser muito adequados para modelagem numérica se as trajetórias de tensões no problema de interesse forem semelhantes às condições dos ensaios. No entanto, a precisão dos modelos descritivos na representação de um determinado comportamento pode ser desafiadora.

Nesse contexto, o NorSand foi aplicado a uma variedade de solos, desde silte argiloso até areia, com bom sucesso (Jefferies, M. 2010). Inicialmente, o NorSand foi usado principalmente para modelar o comportamento da areia, e agora existe experiência suficiente com o NorSand para fornecer intervalos de parâmetros típicos para outros materiais. A abordagem adotada pelo modelo NorSand não se limita a solos dilatantes e pode representar de maneira suave o comportamento de solos desde muito fofos a muito compactos, conforme Jefferies (1993)

Sabe-se que os rejeitos são dispostos em camadas horizontais cujas características dependem das atividades da planta de beneficiamento durante a operação da barragem. Portanto, um reservatório de rejeitos possui um comportamento anisotrópico, conforme citado por Castonguay (2018). Porém, neste estudo, utilizou-se a formulação clássica do NorSand para materiais isotrópicos.

Este estudo tem por objetivo apresentar uma calibração do modelo NorSand a partir dos resultados de ensaios triaxiais e CPTUs aplicados a um rejeito de uma barragem alteada a montante, localizada no Quadrilátero Ferrífero, em obra de descaracterização. Para a avaliação do comportamento do material e calibração do modelo foi utilizado o software RSDData, desenvolvido pela RocScience. Nele foram lançadas as tensões na ruptura e as trajetórias de tensões obtidas nos ensaios triaxiais executados para o material.

3 METODOLOGIA

Para realizar a calibração do modelo NorSand de um rejeito de minério de ferro foram analisados os resultados de uma campanha de investigação geotécnica contemplando 21 ensaios triaxiais, sendo 13 ensaios triaxiais do tipo CIU (adensamento isotrópico e cisalhamento por compressão triaxial não drenada), 4 ensaios triaxial do tipo CID (adensamento isotrópico e cisalhamento por compressão triaxial drenada), 2 ensaios CKU (adensamento anisotrópico e cisalhamento por compressão triaxial não drenada), e 2 ensaios CKD (adensamento anisotrópico e cisalhamento por compressão triaxial drenada). Tais ensaios foram executados para tensões de confinamento variando de 50kPa a 800kPa.

Foi realizada a avaliação do comportamento do material por meio dos gráficos de Tensão Desviadora x Deformação Axial, Variação de Poropressão x Deformação Axial e Variação de Volume x Deformação Axial, em que a horizontalização da curva indica que o estado crítico do material foi atingido. Abaixo é apresentado o resultado do ensaio triaxial da Amostra S02491 onde observa-se que as curvas das quatro tensões confinantes (100kPa, 200kPa, 400 kPa e 800kPa) apresentaram uma tendência a horizontalidade a partir dos 25% de deformação.

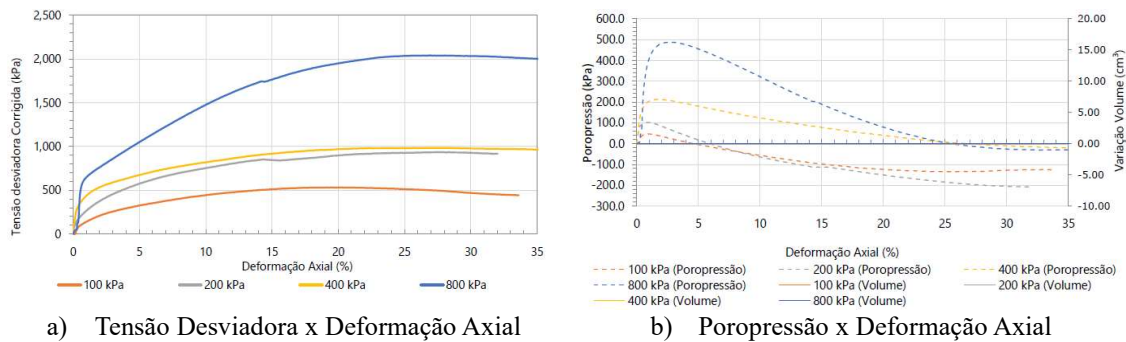


Figura 1. Resultados Gráficos do Ensaio Triaxial da Amostra S02491

A avaliação citada acima identificou que 16 amostras atingiram o estado crítico. Tais amostras/ensaios foram utilizadas para a obtenção da linha de estado crítico por meio do gráfico Índice de Vazios x Log de P'_{oct} e, assim, definir os parâmetros Γ e λ do modelo NorSand, em que o λ corresponde ao coeficiente angular da linha de estado crítico, enquanto o Γ correspondo ao seu coeficiente linear.

Neste rejeito, também foram executados 27 ensaios CPTUs, que foram utilizados para a caracterização do parâmetro de estado ψ . Os dados do CPTU foram analisados pelo software Cpet-it e a obtenção do parâmetro de estado se deu por formulações.

Tais valores obtidos serviram para orientar as calibrações a serem executadas. Os demais parâmetros necessários para a utilização do modelo NorSand foram obtidos por meio da calibração individual de cada ensaio que atingiu o estado crítico, assim como uma análise de todos estes ensaios juntos, por meio do software RSDData, que permite a calibração com a visualização do conjunto de dados.

4 RESULTADOS

Assim, foi elaborado um gráfico Índice de Vazios x Log de P'_{oct} , contemplando apenas as 16 amostras, nas quais foi identificado o atingimento do estado crítico, para a definição da linha de estado crítico (LEC). Ressalta-se que o P'_{oct} é dado pela fórmula abaixo:

$$P'_{oct} = \frac{\sigma'_1 + 2\sigma'_3}{3} \quad (1)$$

O gráfico supracitado é apresentado na Figura 2. Os pontos definidos para a elaboração da LEC correspondem ao último dado obtido no ensaio. Foram analisadas equações exponenciais, linear, logarítmica, polinomial e de potência para avaliar aquela que mais se adequasse à dispersão de dados e a logarítmica foi a que apresentou o maior raio quadrático.

Nota-se um baixo R^2 , devido a heterogeneidade do material, fato esperado para o reservatório de rejeitos, considerando a metodologia de disposição. De qualquer forma, não foi identificado um zoneamento dos rejeitos baseado no local de coleta das amostras, uma vez que não se dispôs de coletas por todo o reservatório, tendo sido concentrado na região da praia de rejeitos.

A linha de estado crítico forneceu o Γ de 1,17 e o λ de 0,053. Tais valores foram utilizados como valores de base para as demais calibrações. Sendo assim, avaliou-se valores entorno deles, mas não se restringindo a eles.

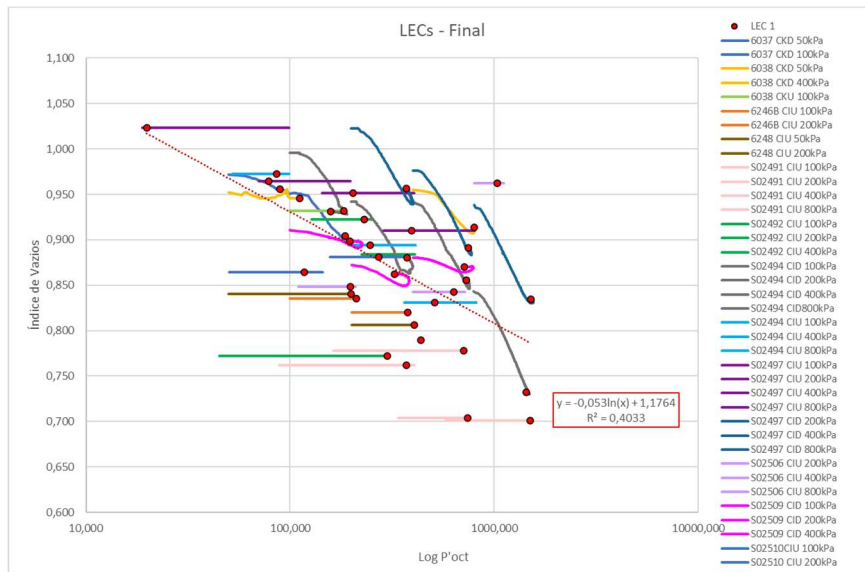


Figura 2. Gráfico Índice de Vazios x Log P'

Os ensaios CPTUs foram analisados no que diz respeito ao parâmetro de estado encontrado. Este ensaio fornece de profundidade, resistência de ponta, poropressão e resistência lateral. Foi utilizado o software Cpet-it para a avaliação dos dados do ensaio e obtenção de output básicos que contribuíram para a determinação do parâmetro de estado por meio da fórmula a seguir:

$$\Psi = 0,56 - 0,33 \cdot \log(Q_{m,cs}) \quad (2)$$

Onde o $Q_{m,cs}$ é obtido pelo produto do Q_m (resistência de ponta normalizada) pelo K_c (fator de correção), para valores de $I_c < 2,6$, conforme Robertson (2022).

Foram plotados os dados de parâmetro de estado por profundidade do rejeito. O gráfico que representa esta compilação de dados é apresentado na Figura 3. Nota-se que a grande concentração do material se encontra no ramo contrátil, com valores de ψ superiores a $-0,05$ e, principalmente entre os valores 0 e 1 .

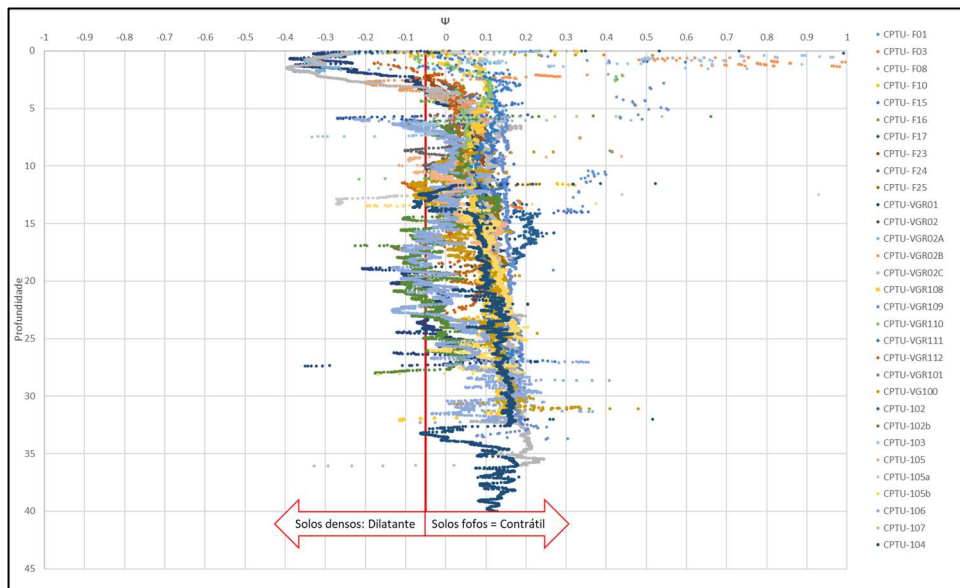


Figura 3. Parâmetro de Estado x Profundidade do Rejeito

Partindo dos dados obtidos nas análises supracitadas e nos ensaios triaxiais, foi realizada uma calibração manual por meio da utilização da planilha NorTx12(r12). Nerlek_270, desenvolvida por Mike Jefferies, para a obtenção dos parâmetros do modelo de NorSand. Nesta planilha, foram estimados valores para os parâmetros

do modelo, de forma a obter uma curva calibrada semelhante à curva obtida no ensaio. A Figura 4 apresenta o resultado da calibração para a amostra 6037 nas tensões confinantes de 50kPa e 100kPa, em que a curva em marrom corresponde aos dados do ensaio e a curva em azul corresponde à calibração realizada.

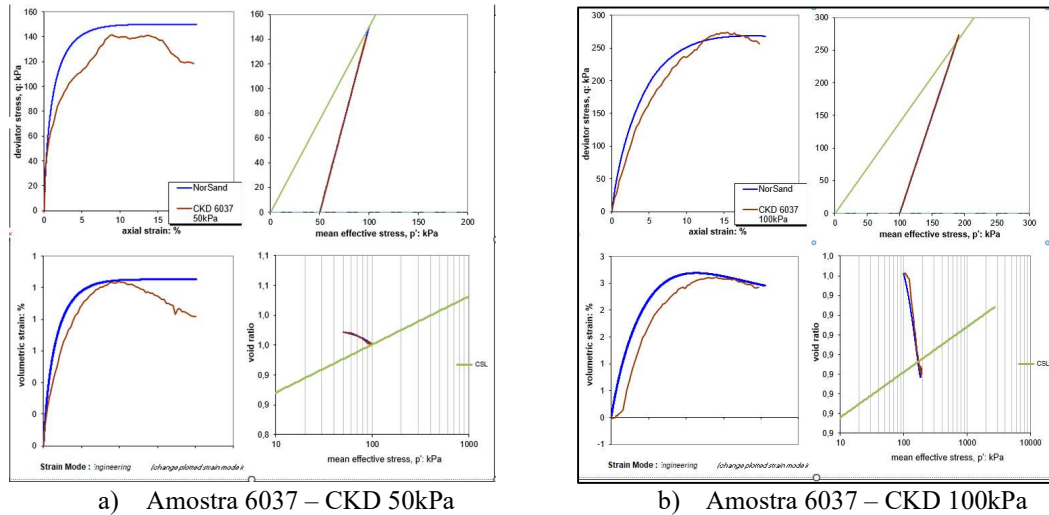


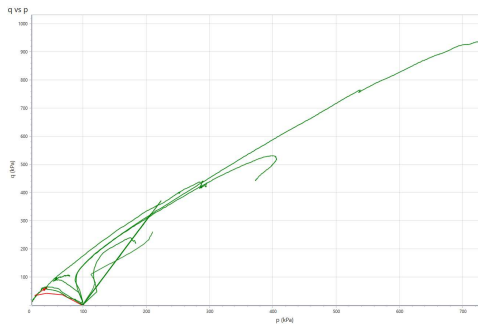
Figura 4. Estudo de Calibração da Amostra 6037

Dentre as 16 amostras selecionadas, 42 tensões confinantes atingiram o estado crítico e estes 42 corpos de prova foram avaliados. A Tabela 1 apresenta o resumo com os valores mínimos, máximos e médios para os parâmetros, obtidos por meio da calibração individual.

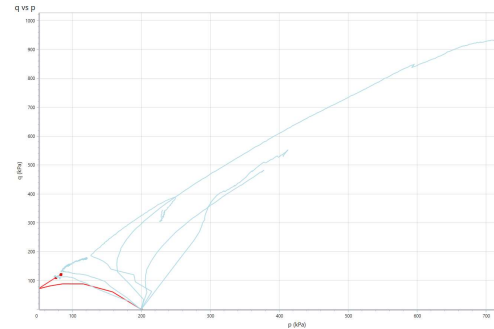
Tabela 1. Resumo da Calibração Individual com Modelo NorSand

Valores	Γ	λ	M_{tc}	N	X_{tc}	H	G_{max} (MPa)	n	Ψ_0	OCR
Média	1,15	0,05	1,49	0,3	3,95	104,75	18,82	0,23	0,001	1
Mínimo	0,59	-0,28	1,10	0,2	0,15	12,00	6,00	0,10	-0,09	1
Máximo	2,05	0,22	1,70	0,4	10,00	500,00	50,00	0,30	0,15	1
Desvio Padrão	0,31	0,08	0,11	0,06	2,71	102,73	11,72	0,07	0,06	0

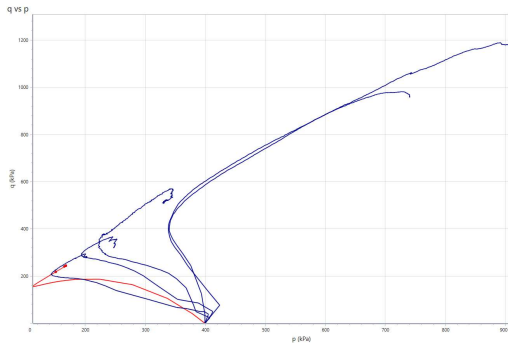
Os valores apresentados na Tabela 1 serviram para nortear a calibração do rejeito como um todo. Nota-se que os valores de Γ e λ obtidos na calibração individual se assemelha aos obtidos na linha de estado crítico. O conjunto de dados dos ensaios triaxiais que atingiram o estado crítico foram inseridos no software RSDData. As calibrações realizadas até o momento serviram de orientação e embasamento para a calibração conjunta do material. A calibração final inseriu os dados pertinentes aos intervalos identificados na calibração individual. As Figuras 5 e 6 apresentam os gráficos com as trajetórias de tensão principais e a curva calibrada (Modelo NorSand) representada pela linha vermelha. Conforme apresentado, a calibração foi feita de forma conservadora, se aproximando das curvas mais baixas. A Tabela 2 apresenta os valores obtidos nesta calibração conjunta.



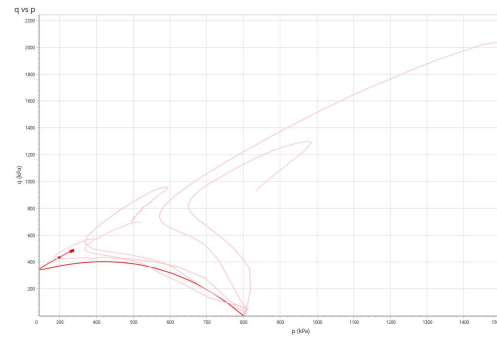
a) Tensão Confinante de 100kPa



b) Tensão Confinante de 200kPa

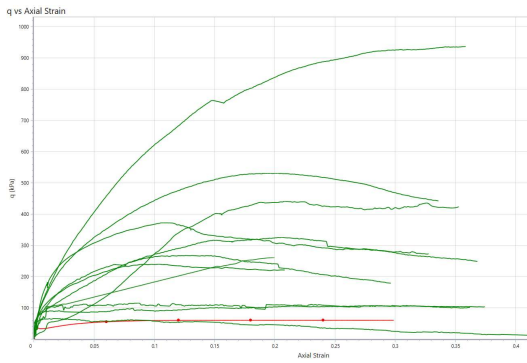


c) Tensão Confinante de 400kPa

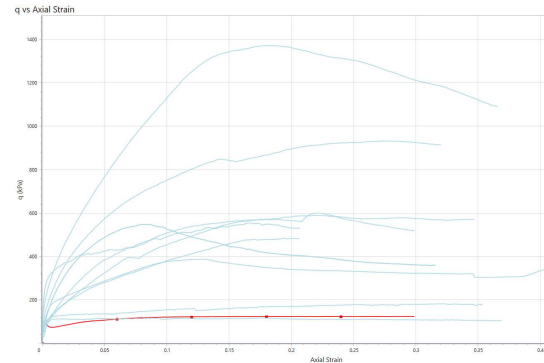


d) Tensão Confinante de 800kPa

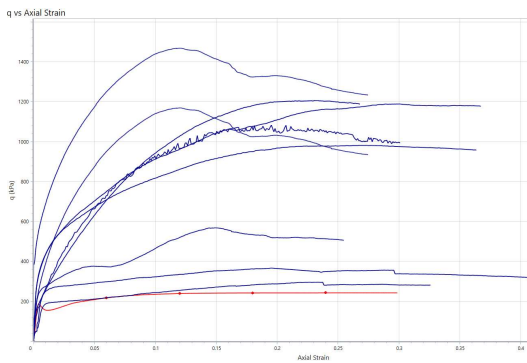
Figura 5. Gráficos tensão x deformação separados por tensões confinantes



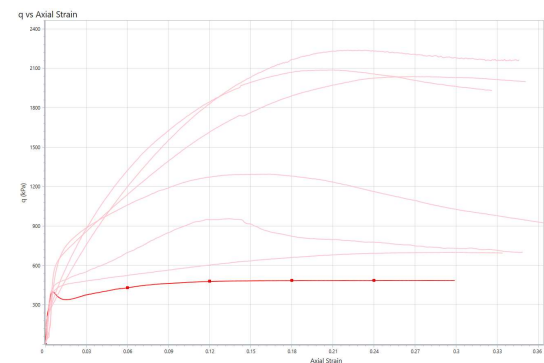
a) Tensão Confinante de 100kPa



b) Tensão Confinante de 200kPa



c) Tensão Confinante de 400kPa



d) Tensão Confinante de 800kPa

Figura 6. Trajetória de Tensões separados por Tensões Confinantes

Tabela 2. Parâmetros do Rejeito – Norsand

Material	Γ	λ	M_{to}	N	X_{tc}	H	G_{max}	n	Ψ_0
Rejeito	1,17	0,053	1,45	0,35	6,38	40	37500	0,3	0,046
Jefferies (2016) (*)	(0,9-1,4)	(0,04-0,07)	(1,30-1,60)	-	>4	-	-	-	-

(*)Areias e Siltes

5 COMENTÁRIOS FINAIS

Este trabalho avaliou os resultados de 42 ensaios triaxiais e 27 ensaios CPTUs em rejeito de minério de ferro. Realizou-se uma calibração individual de cada corpo de prova em que o estado crítico foi atingido, através da planilha de Jefferies (2016) e, posteriormente, uma análise conjunta dos resultados no RSDData. Nota-se que houve uma convergência dos resultados obtidos pelo gráfico de índice de Vazios (e) *versus* Log P'oct, gráfico Parâmetro de estado (Ψ) *versus* profundidade, calibração individual e calibração conjunta.

A calibração apresentou resultados aderentes e muito coerentes com os dados obtidos nos ensaios de laboratório realizados, conseguindo representar de maneira fidedigna o comportamento real do rejeito. Ressalta-se que os valores dos parâmetros encontrados na calibração do modelo constitutivo NorSand estão dentro dos intervalos indicados por Jefferies M. (2016), para solos granulares.

Importante ressaltar que um reservatório de rejeito apresenta grande heterogeneidade e mesmo anisotropia com relação aos parâmetros cuja determinação exata constitui tarefa minuciosa. Além disso, é necessário um banco de dados robusto, que contemple toda a extensão do material a ser analisado. Para um zoneamento/setorização dos rejeitos torna-se fundamental que as investigações sejam espacialmente distribuídas pelo reservatório. Portanto, seria interessante um melhor detalhamento da investigação, com sondagens e CPTUs em regiões mais afastadas do barramento.

A partir de estudos como este, que determinam os parâmetros do material como um todo, poderão ser desenvolvidos estudos de susceptibilidade a liquefação e estudos de tensão deformação mais confiáveis. Ressalta-se que para isso é necessária extensa campanha de investigação geotécnica, contemplando diversos ensaios especiais de laboratório, assim como ensaios de campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Castonguay, V. e Konrad, J. (2018) Anisotropic behavior of a sand predicted by a modified NorSand soil model. Department of civil and water engineering, Université Laval Québec, QC. Canadá. Publicado em GeoEdmonton Moving Forward.

Gomes, A. S. et al (2022). Calibração do modelo constitutivo NorSand para análise do descomissionamento de barragem de rejeito. Cobramseg.

Jefferies, M.G. (1993). Nor-Sand: a simple critical state model for sand. Geotechnique 43.

Jefferies, M.G. & Been K. (2016). Soil Liquefaction: A critical state approach. Taylor & Francis Group, London and New York, 2 vol.

Sternik. K. (2014). Prediction of static liquefaction by Nor San constitutive model. Studia Geotechnica et Mechanica, Vol. XXXVI, No. 3.

Robertson, P. K. (2022). Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test: an update. Canadian Science Publishing.