

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO ATRAVÉS DE MODELAGEM NUMÉRICA DE ENSAIOS *SIMPLE SHEAR*

Mine tailings behavior through numerical modelling of simple shear tests

Helena Portela Farenzena^a, João Vítor de Azambuja Carvalho^a, Guilherme Schmitt Medina^a, Cesar Alberto Ruver^b

^a Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFRGS, Departamento de Engenharia Civil, Brasil.

^b Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

RESUMO – No contexto da engenharia de barragens mundial, o estudo do comportamento dos rejeitos de mineração vem sendo muito fomentado. No Brasil, um país com alta produção mineradora, a preocupação com o comportamento dos rejeitos ganhou ênfase após os desastres recentes. Uma das maneiras de analisar o comportamento destes materiais é por meio de ensaios de laboratório, sendo o equipamento de *Simple Shear*, uma ferramenta robusta para análises com o princípio das deformações planas. Este trabalho objetivou a reprodução de comportamento de um rejeito de mineração de bauxita a partir de modelagem numérica utilizando a versão estudantil do software ABAQUS®. Utilizou-se o modelo constitutivo CamClay Modificado para o material e comparou-se os resultados obtidos com os resultados experimentais apresentados por Gonçalves (2021) para as tensões confinantes efetivas de 50 e 100 *kPa*. O modelo apresentou boa adequação, convergindo para a tensão de confinamento efetiva média.

ABSTRACT – In the context of dam engineering, one topic of great interest is the behavior of mine tailings. In Brazil, a high productivity mining country, the concern about mine tailings behavior increased after recent dam failures. One way to study the strength of these materials is through laboratory tests, specially the Simple Shear tests, which allow to perform analysis by the hypothesis of plane strain. This paper aims to reproduce the behavior of mine tailings when subjected to Simple Shear tests through numerical simulation using the student version of Abaqus®. The analysis performed considered a modified CamClay material and the results were compared to those obtained by Gonçalves (2021), for effective confining stresses of 50 and 100 *kPa*. The numerical model could reproduce fundamental soil behavior, showing good agreement and converging to the mean confining effective stress.

Palavras Chave – modelagem numérica, rejeitos de bauxita, ensaio *simple shear*.

Keywords – numerical modelling, bauxita tailings, simple shear test.

1 – INTRODUÇÃO

A mineração é um dos principais setores industriais do Brasil. De acordo com o IBRAM (2022), um volume de 409 milhões de toneladas de bens minerais foi exportado em 2018, valor

E-mails: helenapfarenzena@gmail.com (H. Farenzena), carvalho.jv@ufrgs.br (J. Carvalho), guilhermemedina.sm@gmail.com (G. Medina), cesar@ufrgs.br (C. Ruver)

ORCID: orcid.org/0000-0002-7555-5022 (J. Carvalho), orcid.org/0000-0003-1520-1422 (C. Ruver)

este que representa 12,5% das exportações totais do país (ANM, 2020). Entretanto, seu processo produtivo possui como subproduto os rejeitos, que são armazenados em barragens ou empilhados a seco em pilhas compactadas. É sabido que os rejeitos são essencialmente compostos de partículas de resíduos de rocha esmagadas derivadas do processo de mineração (Wijewickreme et al., 2005). Estes apresentam características altamente variáveis, dependendo da composição dos minérios de origem e dos processos de extração utilizados. Em geral, os rejeitos podem variar de coloidal a areia em tamanho, com o grau de plasticidade dependendo da atividade superficial do teor de finos (Li e Coop, 2019).

Os principais produtos exportados no primeiro trimestre de 2022, segundo o IBRAM (2022), foram: minério de ferro, ouro, cobre, ferronióbio, bauxita e manganês. A bauxita é a matéria-prima mais utilizada para a produção do alumínio, sendo o terceiro elemento em maior quantidade na crosta terrestre. É encontrada em sua grande maioria em regiões com climas Mediterrâneo, Tropical e Subtropical, por ação do intemperismo dos aluminossilicatos. O clima favorável faz do Brasil uma das maiores reservas de bauxita do mundo (ABAL, 2017).

Com o aumento considerável da produção mineral no mundo, a disposição de tais rejeitos vem se tornando o problema principal, em especial pela redução da perspectiva de utilização de barragens. No Brasil, devido aos desastres recentes que ocorreram com barragens de rejeito de mineração, houveram mudanças na legislação que impactam as estruturas existentes e as que possivelmente viessem a ser construídas (Schaper et al., 2020). Carmo et al. (2017) citam que a ruptura da barragem de Feijão em 2015 liberou cerca de 43 milhões de metros cúbicos de resíduos na bacia do rio Doce; resíduos que chegaram à costa do oceano atlântico, mais de 660 km de distância. Outro caso foi a barragem de Fundão, que chamou a atenção da comunidade geotécnica devido à violência e velocidade da ruptura (Fourie et al., 2022). Ambas as rupturas geraram fatalidades em números alarmantes, totalizando mais de 270 mortes. Santamarina et al. (2019) destacam como lacunas de conhecimento e gestões deficientes contribuem para as falhas catastróficas que reivindicam milhares de vidas ao redor do mundo. Visando suprir estas lacunas de conhecimento, trabalhos vêm sendo feitos com diferentes rejeitos, por exemplo: ouro (James et al., 2011; Schnaid et al., 2013), minério de cobre (Velten et al., 2022; Verdugo e Viertel, 2004), bauxita (Fourie et al., 2021).

Aliada à investigação geotécnica em laboratório, a simulação numérica é um recurso que permite, através de modelos matemáticos condizentes com o problema, prever e observar fenômenos e situações com acurácia e precisão. No entanto, muitas vezes as análises numéricas realizadas restringem-se a suposições do plano de tensões e modelos simples de solo (Budhu e Britto, 1987; Dounias e Potts, 1993). Reyno et al. (2005) apresentam resultados da série Fourier auxiliando a análise de elementos finitos do *Direct Simple Shear*, enquanto Doherty e Fahey (2011) estudaram as diferentes trajetórias de tensão em ensaios *Simple Shear* com anéis rígidos e com membranas não reforçadas, além de explorar a inabilidade do dispositivo *Direct Simple Shear* para impor condições verdadeiras de cisalhamento simples, devido a incapacidade de gerar o cisalhamento complementar necessário nos limites verticais. Um estudo recente (Wai et al., 2022) comparou os resultados dos testes de DSS em um dispositivo do Swedish Geotechnical Institute (SGI) a uma simulação de modelagem numérica de elementos finitos (EF) usando um modelo constitutivo de mecânica de solos do estado crítico (CSSM). Sugeriu-se que o *Direct Simple Shear* do SGI eventualmente subestima a resistência de materiais densos ou ligeiramente contrativos, mas pode superestimar a força de materiais quebradiços soltos predominantemente devido a uma falta de condições reais de volume constante, indo de acordo com suposições de Airey e Muir Wood (1987), DeGroot et al. (1994) e Doherty e Fahey (2011) em argilas.

Desta forma, atrelando a importância da modelagem numérica e caracterização dos rejeitos de mineração, o presente trabalho tem como objetivo aproximar modelos de comportamento de materiais e rejeitos de mineração, por meio de ensaios de laboratório, por fim, apresentando uma modelagem numérica de ensaios *Simple Shear* realizados com rejeitos de mineração de Bauxita.

2 – MATERIAIS EMPREGADOS

O material utilizado no trabalho de Gonçalves (2021) foi um rejeito de mineração de bauxita, advindo de uma jazida localizada na região do estado de Minas Gerais, Brasil. Foram obtidas amostras indeformadas provenientes do processo de beneficiamento da alumina (também conhecido como lama vermelha). O mesmo material foi estudado por Nierwinski (2019). O rejeito estudado é classificado como silte argiloso com traços de areia (peso específico real dos grãos de $30,1 \text{ kN/m}^3$; índice de vazios mínimo (e_{min}) 0,75; e índice de vazios máximo (e_{max}) 2,14). A densidade das partículas sólidas, (G_s) do material é de 3,047, o limite de liquidez (LL) é de 23% e o limite de plasticidade (LP) é de 32%. Na Figura 1 é apresentado o resultado para a análise do rejeito de bauxita pela difratometria de raios-X, onde observa-se uma quantidade predominante de Hematita (Fe_2O_3), Gibsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) e Goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$).

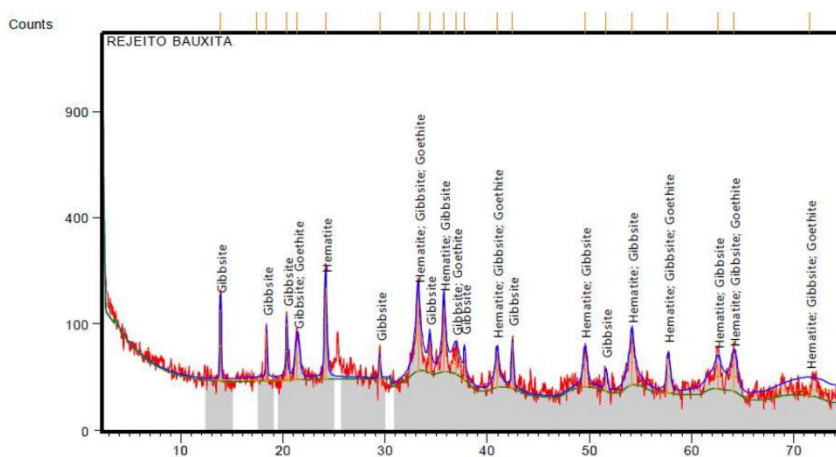


Fig. 1 – Resultado de ensaio de difração de Raio-X para o material estudado (Gonçalves, 2021).

3 – ENSAIOS SIMPLE SHEAR

O ensaio *Simple Shear* é comumente utilizado para medir a resistência e rigidez do solo. Esse ensaio é conhecido por examinar amostras em condições de deformação plana com rotação das tensões principais ao longo do cisalhamento (Doherty e Fahey, 2011). Tais condições são frequentemente representativas de diversas situações em campo como, por exemplo, o modo de cisalhamento adjacente ao fuste de uma estaca (Randolph e Wroth, 1981) ou sob plataformas *offshore* com base gravitacional (Andresen et al., 1979), mais recentemente, diversos autores tem usado equipamentos de *Simple Shear* para estudar rejeitos de mineração (Fanni et al., 2022; Festugato et al., 2013, 2015). Segundo Fourie et al. (2022), o *Simple Shear* tem um papel fundamental na caracterização do comportamento mecânico de rejeitos de mineração. O autor ainda ressalta que o equipamento de *Simple Shear* gera resultados excelentes para ensaios não-drenados.

Gonçalves (2021) realizou os ensaios *Simple Shear* monotônicos no Laboratório de Engenharia Geotécnica e Geotecnologia Ambiental (LEGG) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) (Fig. 2). O objeto de estudo deste trabalho serão os resultados obtidos para os ensaios, cujo equipamento de *Simple Shear* utilizado foi desenvolvido no próprio laboratório e é descrito em Corte (2016).

O ensaio *Simple Shear* consiste no cisalhamento, pela aplicação de um deslocamento horizontal controlado, da amostra na condição de deformações planas, com a variação volumétrica impedida. Os ensaios modelados foram realizados em amostras remoldadas de rejeito de bauxita, utilizando o equipamento *Simple Shear* desenvolvido por (Corte, 2016). Este dispositivo foi inspirado nos equipamentos presentes na University of Western Australia e University of California em Berkeley, onde uma amostra cilíndrica de solo é colocada entre tampas rígidas (superior e inferior), equipada com uma fina membrana de borracha látex não reforçada e colocada dentro de uma câmara de pressão. A consolidação é feita radialmente através do aumento da pressão do fluido confinante (no caso do presente equipamento ar) no interior da câmara e verticalmente através das tampas rígidas. Isso permite o controle independente das tensões de limite verticais e horizontais (Doherty e Fahey, 2011). As amostras foram moldadas pelo método de *Moist Tamping* (Corrêa e Oliveira Filho, 2019; Suits et al., 2003) nas dimensões cilíndricas de 5 cm de altura e 10 cm de diâmetro, com variações de mais ou menos 1% no grau de compactação.

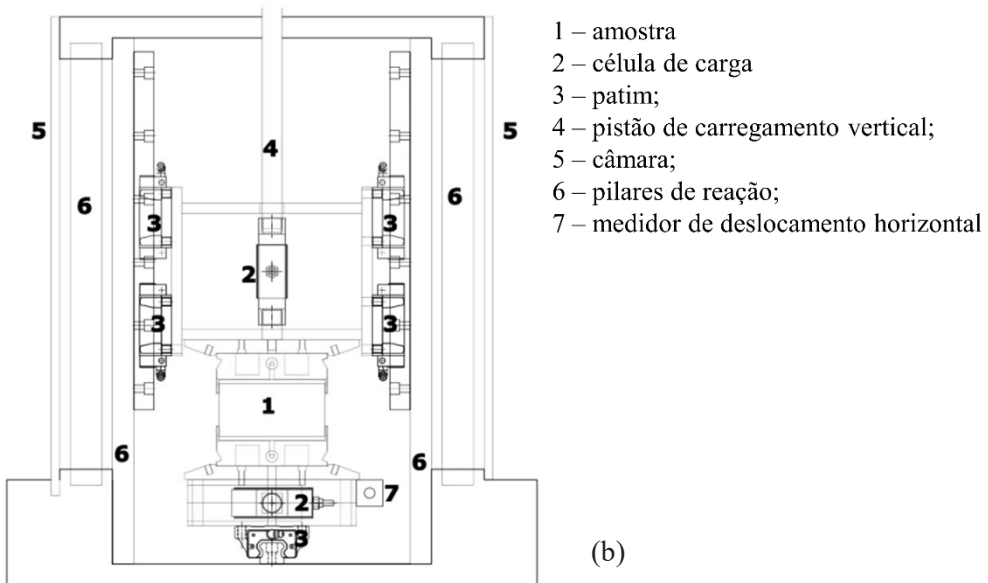
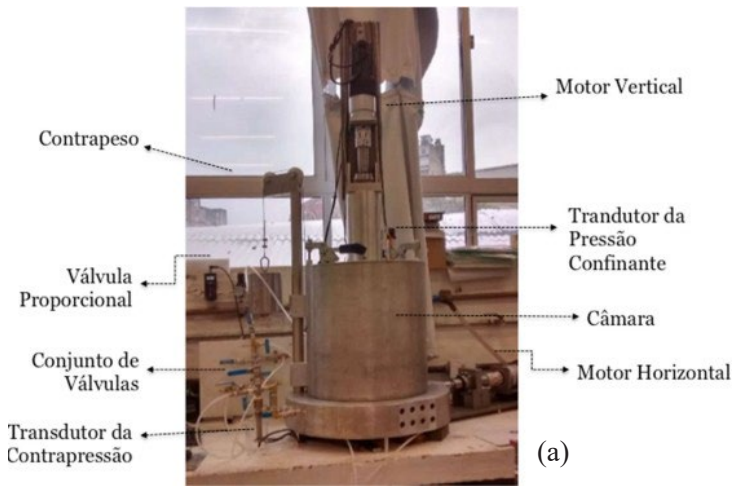


Fig. 2 – Equipamento *Simple Shear* (a) em vista e (b) em corte. Adaptado de Corte (2016).

As tensões confinantes selecionadas para serem reproduzidas através de modelagem numérica foram de 50 e 100 kPa.

As tensões efetivas, parâmetros de resistência e rigidez para os ensaios *Simple Shear* foram calculados com base nos equacionamentos apresentados abaixo. A deformação cisalhante (γ) é calculada conforme a equação seguinte:

$$\gamma = \frac{\Delta d}{h} \quad (1)$$

onde, Δd é o deslocamento horizontal aplicado e h é a altura útil do corpo de prova. A tensão vertical efetiva, por sua vez, foi determinada a partir da equação seguinte, sendo a soma da tensão confinante efetiva (σ'_c) com a tensão desviadora (σ_d), razão entre a carga vertical e a área final de consolidação de amostra:

$$\sigma'_v = \sigma'_c + \sigma_d \quad (2)$$

As tensões principais foram determinadas a partir da equação seguinte, sendo as três tensões principais (σ'_1 , σ'_2 e σ'_3) diferentes, com τ como a resistência ao cisalhamento, calculada através da carga horizontal medida no ensaio, dividida pela área final de consolidação:

$$\begin{cases} \sigma'_{1,3} = \left(\frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma'_v + \sigma'_h}{2} \right)^2 + \tau^2} \\ \sigma'_2 = \sigma'_h \end{cases} \quad (3)$$

As seguintes equações permitem a determinação dos invariantes de tensão p' e q :

$$p' = \frac{1}{3}(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3) \quad (4)$$

$$q = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma'_1 - \sigma'_2)^2 + (\sigma'_1 - \sigma'_3)^2 + (\sigma'_2 - \sigma'_3)^2} \quad (5)$$

e o módulo cisalhante é determinado através de:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (6)$$

4 – MODELO CAM-CLAY MODIFICADO

O Modelo Cam-Clay Modificado, desenvolvido na Universidade de Cambridge, é um modelo de comportamento tensão-deformação de solos baseado na teoria de estado crítico (Roscoe e Burland, 1968; Schofield e Wroth, 1968). O software Abaqus® conta com uma implementação do modelo disponível para aplicação na modelagem por elementos finitos que é capaz de descrever o comportamento inelástico do material através de uma função de plastificação que depende de três invariantes de tensão, uma lei de fluxo associada que define uma taxa de deformação plástica e uma lei de endurecimento que modifica o tamanho da superfície de plastificação conforme a ocorrência de deformações volumétricas plásticas (Dassault Systemes, 2015).

Neste modelo, a superfície crítica é assumida com formato cônico no espaço das tensões efetivas principais, cujo vértice é coincidente com a origem do sistema (Helwany, 2007). As Figuras 3a e 3b apresentam, respectivamente, a representação tridimensional e a projeção da superfície de plastificação, definida na formulação do modelo.

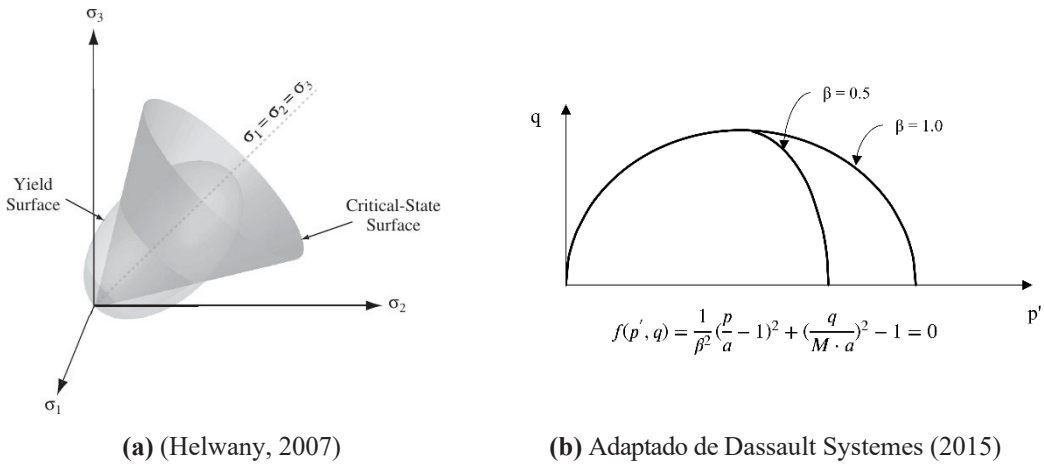


Fig. 3 – Superfícies de plastificação e de estado crítico do Modelo Cam-Clay modificado, à esquerda (a) a representação no espaço de tensões efetivas principais e à direita (b) a projeção no plano p' - q .

Além disso, nesse modelo é considerado uma lei de enrijecimento volumétrica. Ou seja, a superfície de plastificação do material é ampliada de acordo com as deformações volumétricas sofridas pelo material, não sendo afetada pelas deformações cisalhantes (Yu, 2006).

Portanto, foi considerado uma modelagem levando em conta o comportamento elasto-plástico do material pela consideração de constantes elásticas e do uso do modelo Cam-Clay modificado. Os parâmetros necessários para definição do modelo elástico são: a inclinação κ da linha de recompressão; o coeficiente de poisson (ν) ou o módulo cisalhante inicial (G_0). Enquanto para o modelo Cam-Clay modificado são: a inclinação λ da linha de compressão isotrópica; o índice de vazios inicial da amostra (e_0); e o início da superfície de plastificação, dado por $p'_0/2$, onde p'_0 é a coordenada no eixo p' em que a superfície de plastificação intercepta o eixo das abcissas. Tais parâmetros foram obtidos através de resultados de ensaios triaxiais e de adensamento oedométrico e ajustados por retroanálise através da modelagem numérica dos ensaios. A Tabela 1 apresenta os valores adotados.

Tabela 1 – Parâmetros adotados na definição do modelo Cam-Clay para as tensões de confinamento avaliadas.

Tensão (kPa)	λ	κ	M	Índice de vazios (e_0)	G_0 (kPa)
50	0.135	0.096	1.139	1.29	7.00E+03
100	0.135	0.096	1.139	1.207	1.00E+04

O valor de M adotado corresponde ao obtido para um ângulo de Lode (θ) de 30° que corresponde à trajetória seguida por um ensaio *simple shear*. Esse valor foi obtido a partir do ângulo de atrito no estado crítico obtido por Gonçalves (2021) e utilizando a seguinte (Doherty e Fahey, 2011).

$$M(\theta) = \left(\frac{\sin \phi'}{\frac{\cos \theta}{\sqrt{3}} - \frac{\sin \theta \sin \phi'}{3}} \right) \quad (7)$$

Essa equação é representativa do estado de tensões existente durante o ensaio. É importante ressaltar que esse parâmetro é diretamente relacionado à natureza do ensaio. Comumente, o valor de M é obtido a partir de ensaios triaxiais, que apresentam um outro estado de tensões, com a tensão intermediária (σ'_2) igual a tensão principal menor (ensaio de compressão triaxial) ou à tensão principal maior (ensaio de extensão triaxial). No modelo implementado no software, o parâmetro de entrada é o valor de M , dependente da tensão intermediária, e não os parâmetros de resistência de Mohr-Coulomb. Portanto, a utilização de um valor de M relacionado a um estado de tensões diferente corresponderia à parâmetros de resistência diferentes e, portanto, uma envoltória no plano p - q que não é representativa do estado de tensões do cisalhamento puro.

Esse modelo foi escolhido por se tratar de um modelo constitutivo clássico, muito utilizado na prática de engenharia. Muitas vezes, esse e outros modelos são considerados sendo que haja pleno conhecimento de suas limitações e hipóteses assumidas quando do seu desenvolvimento o que pode levar a falhas e projetos que não atendem aos requisitos mínimos de segurança (Muir Wood, 2004). A apresentação de resultados que discutam as limitações do modelo e a sua capacidade de reproduzir diferentes comportamentos visa contribuir para o processo de tomada de decisão durante o projeto de estruturas de contenção de rejeitos.

5 – MODELO COMPUTACIONAL

O modelo computacional adotado aproveitou a simetria existente no problema, a fim de reduzir o esforço computacional e otimizar os resultados, dadas as limitações de tempo de processamento e da restrição imposta pela versão estudantil do software de 1000 nós. A Figura 4 (a, b) apresenta a idealização do modelo mecânico a ser reproduzido na modelagem computacional e as condições de contorno adotadas, sendo elas: restrição do deslocamento no eixo z ; aplicação de uma condição de carregamento hidrostática no início do ensaio; deslocamento a uma velocidade constante de 0.1 mm/s na direção horizontal.

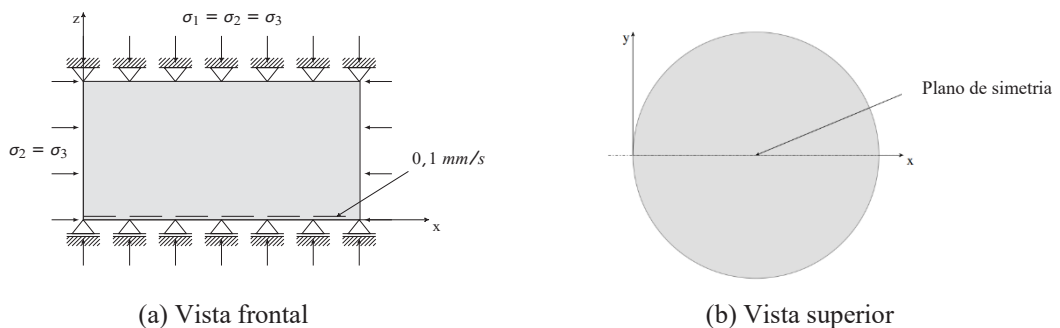


Fig. 4 – Modelo computacional adotado

Foi adotada uma malha uniforme de 732 nós de dimensões 7 mm, composta de elementos do tipo C3D8P, cuja formulação é a de um elemento hexaédrico com 8 nós, deslocamento trilinear e poropressão trilinear (Dassault Systemes, 2015). Dada a natureza do ensaio, corpo de prova cilíndrico com carregamento uniforme na face inferior, portanto com o plano de simetria apenas no centro do cilindro, foi necessária a realização da modelagem tridimensional para a correta

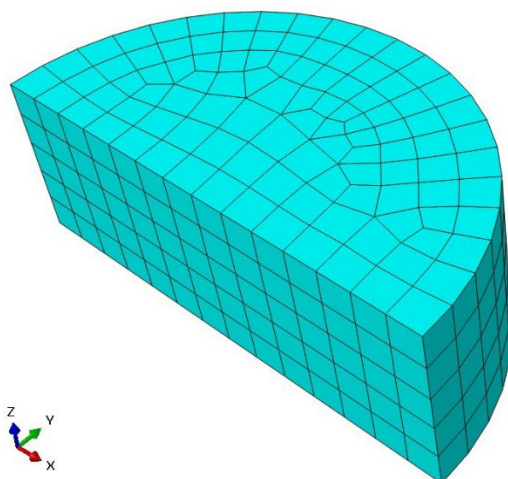


Fig. 5 – Discretização do modelo computacional através da malha de elementos finitos.

avaliação da resposta do material. A Figura 5 apresenta o modelo utilizado e a malha de elementos finitos empregada na análise.

Os corpos de prova para os ensaios são cilíndricos, possuindo 50mm de altura e 100mm de diâmetro. Os ensaios *Simple Shear* foram consolidados à tensão efetiva desejada antes do início do cisalhamento. O cisalhamento, foi realizado na condição não drenada, com uma velocidade constante de aproximadamente $0,1\text{mm/s}$, sendo conduzido até uma deformação cisalhante de 40%, aproximadamente. Na altura considerada na modelagem, foram descontados da altura inicial os valores das ranhuras, existentes no equipamento, da deformação axial ocorrida durante a consolidação. A deformação cisalhante aplicada na modelagem foi de 40%, já o índice de vazios utilizado foi o obtido após a consolidação da amostra, disponibilizado por Gonçalves (2021) e com valores de 1,290 e 1,207 para tensão confinante de 50 kPa e 100 kPa , respectivamente.

6 – RESULTADOS

Os resultados do diagrama tensão deformação obtidos, para tensões confinantes de 50 e 100 kPa, a partir da modelagem, comparativamente com os encontrados nos ensaios *Simple Shear* realizados em laboratório, podem ser observados na Figura 6. É possível observar que o resultado das curvas de tensão deformação reais foram pouco dispersos quando comparados com os modelados, isto é, a modelagem mostrou resultados representativos do comportamento dos materiais estudados. A curva para tensão confinante de 100 kPa foi melhor representada pela modelagem, já a curva para tensão confinante de 50 kPa apresentou uma pequena diferença em relação ao sutil pico da curva do ensaio, aproximadamente de 4 kPa . Os resultados numéricos foram obtidos pela consideração de um vínculo do tipo *Multi-point constraint*. Dessa forma é possível vincular o deslocamento de toda a superfície a um único ponto (como ocorre no ensaio) e obter a força de reação nesse ponto (simulação da célula de carga) (Dassault Systemes, 2015). A partir dessa força de reação e da área da amostra, obtém-se a tensão cisalhante atuante na face.

A Figura 7 apresenta os resultados de variação de poropressão e tensão vertical efetiva em função da deformação cisalhante. Para o ensaio com 100 kPa de tensão confinante efetiva, os resultados da modelagem se mostraram muito próximos, no entanto, o ensaio com 50 kPa não apresentou bom comportamento. Na Figura 7a o ensaio com a menor tensão confinante efetiva demonstrou variação de poropressão positiva muito acentuada, fato que pode ser devido a técnica de moldagem, perda das condições de contorno durante o ensaio ou tempo de consolidação inferior ao necessário para que se estabilizassem todas as deformações volumétricas.

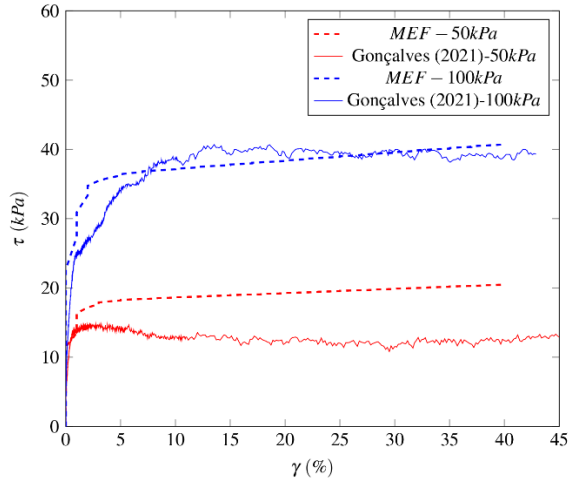


Fig. 6 – Diagrama Tensão Cisalhante vs Deformação Cisalhante para amostras ensaiadas a 50 e 100 kPa de tensão confinante.

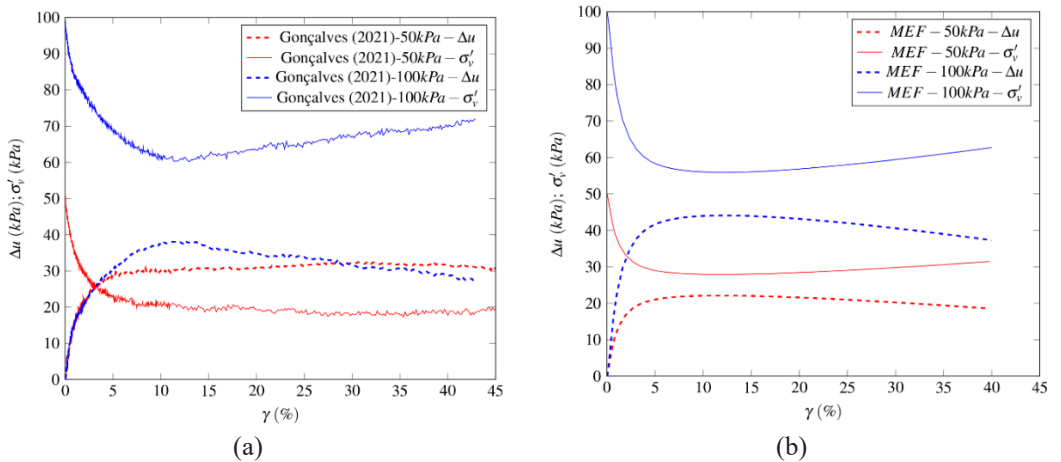


Fig. 7 – Diagramas Excesso de poropressão vs Deformação Cisalhante para amostras ensaiadas a 50 e 100 kPa (a) e para simulações numéricas (b).

Além disso, amplia-se a análise para o diagrama tensão cisalhante vs tensão efetiva vertical efetiva (Fig. 8) ratificando a convergência do modelo. A Figura 7 elucida a geração de poropressão positiva sofrida pela amostra quando cisalhada e também a capacidade do modelo numérico para a representação do comportamento do material ao longo do cisalhamento. É importante observar que não foi possível reproduzir através da modelagem numérica a variação na tensão vertical efetiva gerada pelo excesso de poropressão no ensaio de 50 kPa de tensão confinante efetiva, o que se reflete na diferença obtida nas trajetórias de tensões.

Isolou-se o comportamento tensão cisalhante vs tensão efetiva vertical efetiva para a modelagem aplicada e obteve-se os parâmetros geotécnicos (Fig. 9). Os parâmetros geotécnicos estimados por Gonçalves (2021) foram de ângulo de atrito (ϕ') 30,86°, e coesão efetiva (c') nula conforme esperado para rejeitos de mineração, como solos finos não coesivos (Fanni et al., 2022; Festugato et al., 2015).

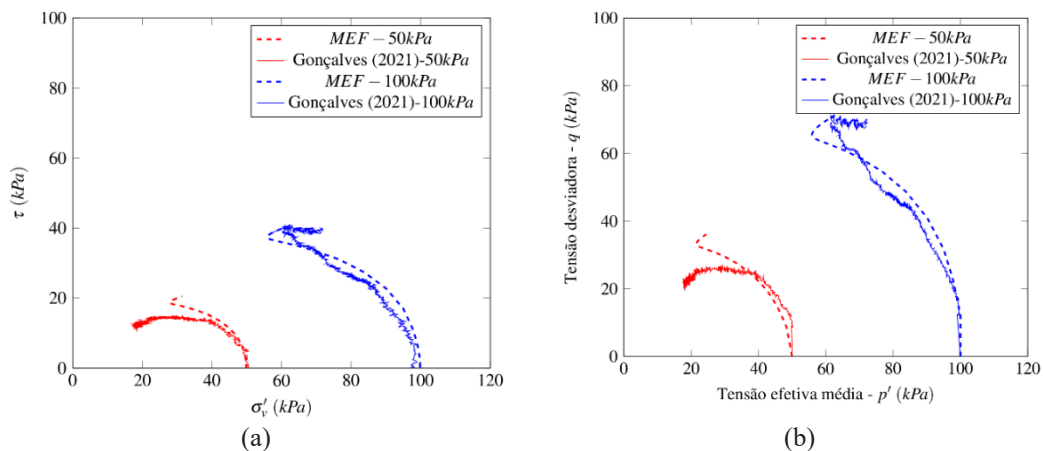


Fig. 8 – Trajetórias de tensão no plano (a) Diagrama Tensão Cisalhante vs Tensão Vertical Efetiva e (b) Tensão efetiva média vs tensão desviadora para amostras modeladas a 50 e 100 kPa de tensão confinante e para amostras ensaiadas a 50 e 100 kPa de tensão confinante.

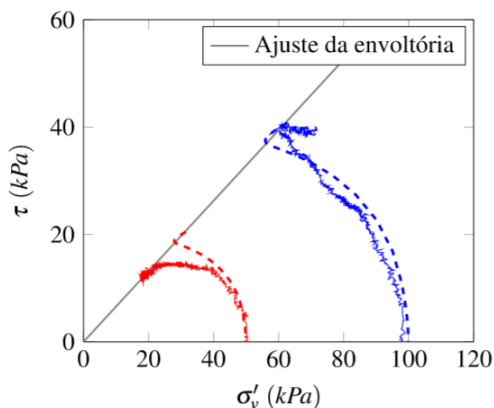
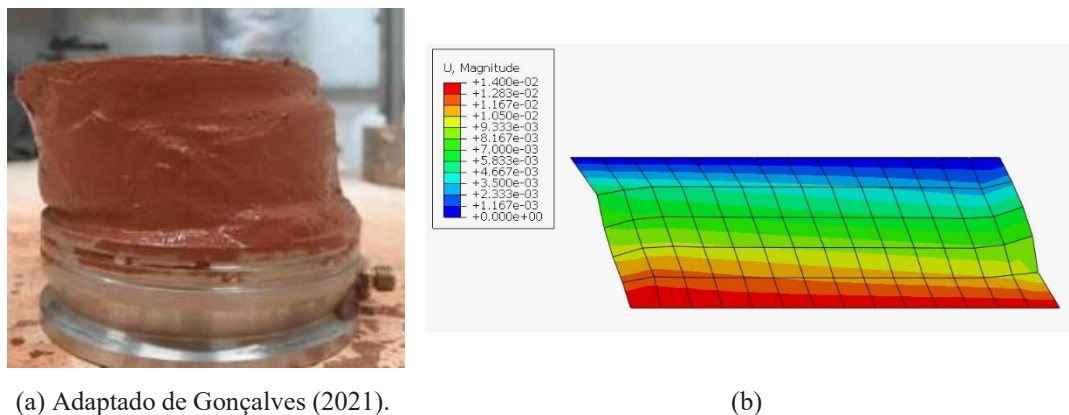


Fig. 9 – Ajuste da envoltória de ruptura para os resultados obtidos através de modelagem numérica.



(a) Adaptado de Gonçalves (2021).

(b)

Fig. 10 – Modo de ruptura obtido no corpo de prova nos ensaios de laboratório (a) e na modelagem numérica (b).

Além disso, é possível fazer uma análise comparativa entre o modo de ruptura observado no ensaio e obtido na modelagem numérica. A Figura 10(a, b) demonstra visualmente que os deslocamentos encontrados no ensaio e na modelagem apresentam comportamento semelhantes, principalmente no formato de ruptura gerado.

Outro aspecto possibilitado pela modelagem numérica é a visualização da distribuição de tensões na amostra durante o ensaio. A Figura 11 apresenta os resultados numéricos obtidos.

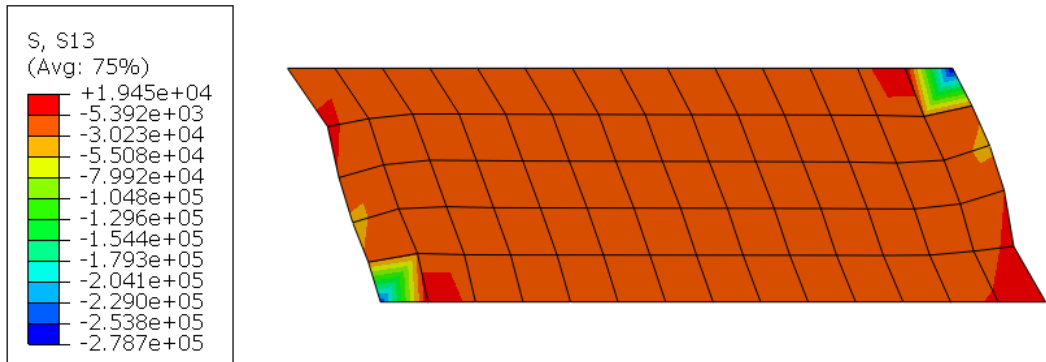


Fig. 11 – Distribuição de tensões cisalhantes na amostra.

7 – CONCLUSÃO

Por fim, foi possível observar que a modelagem numérica utilizada no desenvolvimento deste trabalho apresentou resultados representativos do comportamento experimental verificado para o rejeito de Bauxita analisado. A curva com tensão confinante de 100 kPa modelada apresentou maior convergência com a observada no ensaio, em contrapartida a curva para tensão confinante de 50 kPa apresentou uma diferença em relação ao sutil pico da curva do ensaio de cerca de 4 kPa, que pode ter ocorrido devido a um excesso de poropressão gerado na consolidação e não dissipado antes do início do cisalhamento.

A modelagem conseguiu representar a geração de poropressão positiva ao longo do cisalhamento, entretanto o modelo numérico não conseguiu modelar perfeitamente o comportamento de perda de resistência observado no diagrama tensão cisalhante vs tensão efetiva vertical efetiva. Os parâmetros geotécnicos encontrados na modelagem apresentaram-se dentro do padrão para rejeitos de mineração com partículas finas não coesivas. Por fim, uma análise visual comparativa entre o modo de ruptura observado na amostra após o ensaio e o obtido na modelagem numérica foi realizada e apresentou resultados coerentes, demonstrando a capacidade da modelagem numérica escolhida de representar os fenômenos envolvidos e a compatibilidade de deslocamentos entre o modelo experimental e numérico.

8 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pela disponibilização de bolsas de Mestrado e à Msc. Rosanne Gonçalves pela disponibilização dos dados experimentais utilizados neste trabalho.

9 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL (2017). *Bauxita no Brasil: Mineração responsável e competitividade*. Associação Brasileira do Alumínio. 66 p.

- Airey, D. W.; Muir Wood, D. (1987). *An evaluation of direct simple shear tests on clay*. *Géotechnique*, 37(1), 25–35. <https://doi.org/10.1680/geot.1987.37.1.25>
- Andresen, A.; Berre, T.; Kleven, A.; Lunne, T. (1979). *Procedures used to obtain soil parameters for foundation engineering in the North Sea*. *Marine Technology*, 3(3), 201–266.
- ANM (2020). *Anuário Mineral Brasileiro: Principais Substâncias Metálicas—Ano Base 2108*. Agência Nacional de Mineração. 42 p.
- Budhu, M.; Britto, A. M. (1987). *Numerical analysis of soils in simple shear devices*. *Soils Foundations*, 27(2), 31–41.
- Carmo, F. F. do; Kamino, L. H. Y.; Junior, R. T.; Campos, I. C. de; Carmo, F. F. do; Silvino, G.; Castro, K. J. da S. X. de; Mauro, M. L.; Rodrigues, N. U. A.; Miranda, M. P. de S.; Pinto, C. E. F. (2017). *Fundão tailings dam failures: The environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context*. *Perspectives in Ecology and Conservation*, 15(3), 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.pecon.2017.06.002>
- Corrêa, M. M.; Oliveira Filho, W. L. (2019). *Impact of methods used to reconstitute tailings specimens on the liquefaction potential assessment of tailings dams*. *REM - International Engineering Journal*, 72(3), 507–513. <https://doi.org/10.1590/0370-44672018720164>
- Corte, M. B. (2016). *Desenvolvimento de Equipamento para Ensaio Simple Shear*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Dassault Systemes. (2015). *Abaqus 2016 Online Documentation*. <http://abaqus.software.polimi.it/v2016/books/usb/default.htm>
- DeGroot, D. J.; Germaine, J. T.; Ladd, C. C. (1994). *Effect of Nonuniform Stresses on Measured DSS Stress-Strain Behavior*. *Journal of Geotechnical Engineering*, 120(5), 892–912. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:5\(892\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:5(892))
- Doherty, J.; Fahey, M. (2011). *Three-dimensional finite element analysis of the direct simple shear test*. *Computers and Geotechnics*, 38, 917–924. <https://doi.org/doi:10.1016/j.compgeo.2011.05.005>
- Dounias, G. T.; Potts, D. M. (1993). *Numerical analysis of drained direct and simple shear tests*. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119(12), 1870–1891.
- Fanni, R.; Reid, D.; Fourie, A. (2022). *On reliability of inferring liquefied shear strengths from simple shear testing*. *Soils and Foundations*, 62(3), 101151. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2022.101151>
- Festugato, L.; Consoli, N. C.; Fourie, A. (2015). *Cyclic shear behaviour of fibre-reinforced mine tailings*. *Geosynthetics International*, 22(2), 196–206. <https://doi.org/10.1680/gein.15.00005>
- Festugato, L.; Fourie, A.; Consoli, N. C. (2013). *Cyclic shear response of fibre-reinforced cemented paste backfill*. *Géotechnique Letters*, 3(1), 5–12. <https://doi.org/10.1680/geolett.12.00042>
- Fourie, A. B.; Reid, D.; Ayala, J. L.; Russell, A. R.; Vo, T.; Rahman, M.; Vinod, J. (2021). *Improvements in estimating strengths of loose tailings: Results from the TAILLIQ research project*. *Proc. Mine Waste and Tailings*, 207–217.
- Fourie, A. B.; Verdugo, R.; Bjelkevik, A.; Torres-Cruz, L. A.; Znidarcic, D. (2022). *Geotechnics of mine tailings: A 2022 State of the Art*. *Proceedings of the 20th ICSMGE. 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Sydney, Australia.

- Gonçalves, R. R. S. (2021). *Comportamento Geomecânico de Rejeito de Bauxita sob Diferentes Condições de Confinamento e Carregamento*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Helwany, S. (2007). *Applied Soil Mechanics with Abaqus Applications*. John Wiley & Sons.
- IBRAM. (2022). *Relatório Anual de Atividades—Ano Base 2018*. Instituto Brasileiro de Mineração.
- James, M.; Aubertin, M.; Wijewickreme, D.; Wilson, G. W. (2011). *A laboratory investigation of the dynamic properties of tailings*. Canadian Geotechnical Journal, 48(11), 1587–1600. <https://doi.org/10.1139/t11-060>
- Li, W.; Coop, M. R. (2019). *The Mechanical behaviour of Panzhihua iron tailings*. Canadian Geotechnical Journal, 56(3), 420–435. <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0032>
- Muir Wood, D. (2004). *Geotechnical modelling*. Spon Press.
- Nierwinski, H. P. (2019). *Caracterização e comportamento Geomecânico de Rejeitos de Mineração*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Randolph, M.; Wroth, C. P. (1981). Application of the failure state in undrained simple shear shaft capacity of driven piles. *Géotechnique*, 31(1), 143–157.
- Reyno, A. J., Airey, D. W.; Taiebat, H. A. (2005). *Influence of height and boundary conditions in simple shear tests*. *Frontiers in offshore geotechnics*.
- Roscoe, K. H.; Burland, J. B. (1968). *On the generalized Stress-Strain Behavior of Wet Clays*. *Engineering Plasticity*, 535–608.
- Santamarina, J. C.; Torres-Cruz, L. A.; Bachus, R. C. (2019). *Why coal ash and tailings dam disasters occur*. *Science*, 364(6440), 526–528. <https://doi.org/10.1126/science.aax1927>
- Schaper, D.; Lessa, R.; Freitas, A.; Weeks, B. (2020). *De-characterization and closure of TSF: concepts of the Brazilian legislation and international criteria*. *Planning for Closure 2020*, 3rd International Congress on Planning for Closure of Mining Operations (Chapter 6), 12 p.
- Schnaid, F.; Bedin, J.; Viana da Fonseca, A. J. P.; de Moura Costa Filho, L. (2013). *Stiffness and Strength Governing the Static Liquefaction of Tailings*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 139(12), 2136–2144. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000924](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000924)
- Schofield, A.; Wroth, C. P. (1968). *Critical State Soil Mechanics*. McGraw-Hill.
- Suits, L. D.; Sheahan, T.; Frost, J.; Park, J.-Y. (2003). *A Critical Assessment of the Moist Tamping Technique*. *Geotechnical Testing Journal*, 26(1), 9850. <https://doi.org/10.1520/GTJ11108J>
- Velten, R. Z.; Consoli, N. C.; Filho, H. C. S.; Wagner, A. C.; Schnaid, F.; Da Costa, J. P. R. (2022). *Influence of grading and fabric arising from the initial compaction on the geomechanical characterisation of compacted copper tailings*. *Géotechnique*, 1–12. <https://doi.org/10.1680/jgeot.22.00087>
- Verdugo, R.; Viertel, P. (2004). *Effect of density and fines content on the cyclic strength of copper tailings*. V Congreso Chileno de Geotecnia.
- Wai, D.; Manmatharajan, M. V.; Ghafghazi, M. (2022). *Effects of Imperfect Simple Shear Test Boundary Conditions on Monotonic and Cyclic Measurements in Sand*. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 148(1), 04021164. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002682](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002682)

Wijewickreme, D.; Sanin, M. V.; Greenaway, G. R. (2005). *Cyclic shear response of fine-grained mine tailings*. Canadian Geotechnical Journal, 42, 1408–1421.
<https://doi.org/10.1139/t05-058>

Yu, H.-S. (2006). *Plasticity and geotechnics*. Springer-Verlag.