

Influência da história de tensões no comportamento de rejeitos de mineração

João Vítor de Azambuja Carvalho

Doutorando, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, carvalho.jv@ufrgs.br

Alexia Cindy Wagner

Doutoranda, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, alexia-wagner@hotmail.com

Hugo Carlos Scheuermann Filho

Pós-Doc, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, hugocsf@ufrgs.br

João Paulo de Sousa Silva

Engenheiro Sênior, VALE S.A. , Belo Horizonte, Brasil, joao.paulo.silva@vale.com

Nilo Cesar Consoli

Professor, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, consoli@ufrgs.br

RESUMO: Nos últimos anos, rupturas envolvendo barragens de rejeitos ocorreram ao redor do mundo. Essas rupturas trouxeram à tona a lacuna de conhecimento sobre o comportamento de rejeitos e a necessidade de sistemas de disposição que sejam mais seguros. Em razão disso, as agências reguladoras aprovaram novas legislações demandando o descomissionamento das barragens de rejeitos alteadas a montante e a proibição da construção de novas. Porém, a necessidade de dispor os rejeitos gerados permanece e novas alternativas para a disposição precisam ser buscadas. Uma alternativa é a disposição de rejeitos filtrados. Nesse método, os rejeitos são filtrados a fim de atingir uma umidade próxima a sua umidade ótima de compactação e compactados em pilhas que podem atingir centenas de metros de altura. A construção dessas estruturas requer profundo conhecimento do comportamento dos rejeitos a fim de reduzir os riscos e manter a sua segurança. Sendo assim, este artigo tem o objetivo de investigar os efeitos da história de tensões no comportamento de rejeitos de mineração a fim de entender o comportamento desses materiais em situações a que possam estar submetidos durante a vida útil de instalações de rejeito filtrado. Ensaios triaxiais foram realizados em amostras compactadas e sobreadensadas e as diferenças comparadas. Os resultados demonstram que os efeitos de sobreadensamento são desprezíveis para baixos níveis de tensões.

PALAVRAS-CHAVE: rejeitos filtrados, história de tensões, ensaios triaxiais, empilhamento de rejeitos

ABSTRACT: Tailings dams ruptures have occurred worldwide in the last few years. These accidents brought to light the lack of knowledge regarding the behaviour of tailings and the need for safer deposition methods. As a reason, regulatory agencies have approved new legislation demanding the decommissioning of upstream raised dams and prohibiting the construction of new ones. However, the produced tailings still have to be disposed of, and new alternatives for the deposition are required. One option is the filtered tailings deposition. In this method, tailings are filtered to moisture contents close to their optimum moisture content for compaction and compacted into piles that may achieve hundreds of meters in height. The construction of these structures requires deep knowledge on tailings' behavior to reduce risks and increase safety. Therefore, this paper aims to investigate the effects of stress history on the behavior of mining tailings accounting for the conditions they may experience during the lifecycle of filtered tailings facilities. Triaxial tests were conducted on dense and overconsolidated specimens and the differences evaluated. The results demonstrated that the effects of stress history are negligible for low stress levels.

KEYWORDS: filtered tailings, stress history, triaxial tests, tailings' stacking

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma das principais atividades econômicas ao redor do mundo. Em especial no Brasil, a exploração de minério de ferro correspondeu à cerca de 250 bilhões de reais no ano de 2022 (ANM, 2023). A atividade de mineração consiste da exploração de jazidas naturais e extração dos minerais de interesse. Dependendo do material e da concentração da jazida, processos para aumentar a concentração do mineral de interesse podem ser necessários. Nessas etapas, são produzidos subprodutos do beneficiamento, conhecidos como rejeitos. No caso do minério de ferro, a principal região exploradora no Brasil é o Quadrilátero Ferrífero, responsável por aproximadamente 60% da produção brasileira.

Grande parte das jazidas do Quadrilátero ferrífero são compostas por minério de baixa concentração, para os quais o beneficiamento é mandatório (Dauce et al., 2019). No processo usual de beneficiamento esses materiais são cominuídos, classificados e concentrados (Lima et al., 2011). Ao final do processo de beneficiamento, normalmente os rejeitos gerados se encontram em estado de lama, com altos teores de umidade (Consoli et al., 2024). A destinação desses rejeitos na maior parte das vezes se deu em barragens. Quando era esgotada a capacidade de armazenamento dessas estruturas, ampliações eram feitas, também conhecidas como alteamentos. O alteamento de barragens pode ser de diferentes métodos (Fig. 1) como por exemplo: à montante, à jusante, ou por linha de centro (Silva et al., 2024).

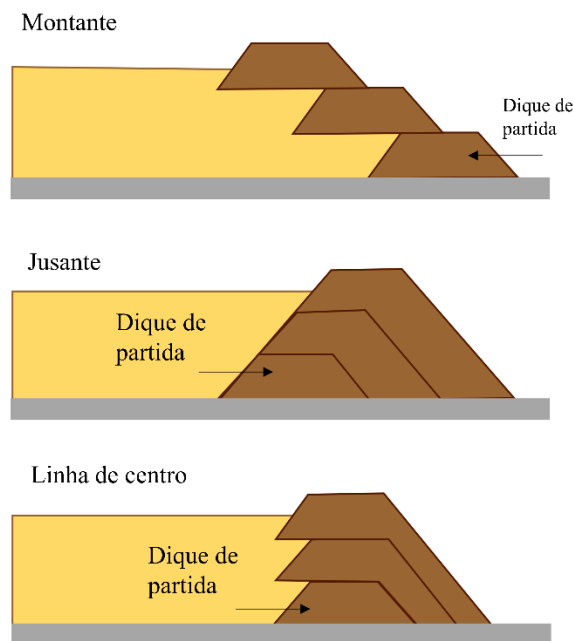


Figura 1. Métodos de alteamento de barragens. Adaptado de Silva et al. (2024).

No entanto, os recentes acidentes que ocorreram envolvendo as barragens de Brumadinho (Robertson et al., 2019) e Fundão (Morgenstern et al., 2016), trouxeram à tona a lacuna de conhecimento envolvendo o comportamento de rejeitos de mineração. A partir desses incidentes, novas legislações (ANM nº 4/2019, 2019; ANM nº 13/2019, 2019) determinando a descaracterização de barragens alteadas pelo método à montante e a proibição da construção de novas barragens com esse método foram estabelecidas no Brasil. Sendo assim, novas alternativas precisaram ser buscadas para a disposição dos rejeitos oriundos da produção de minério de ferro. Uma das alternativas é a disposição em pilhas de rejeitos filtrados e compactados (Consoli et al., 2022; Wagner et al., 2023). Nessas estruturas o rejeito é filtrado até teores de umidade próximos à umidade ótima de compactação e compactados para formar pilhas que podem atingir centenas de metros de altura (Davies, 2011).

Essas estruturas podem experimentar diferentes condições de carregamento durante sua vida útil, submetendo os rejeitos a diferentes histórias de tensões e estados iniciais. Além disso, os rejeitos são um material antropogênico, de origem industrial, o que os confere características diferentes de solos convencionais. Normalmente, os rejeitos de mineração apresentam maior angularidade, rugosidade das partículas e também mineralogia mista (Yang et al., 2019). No caso do rejeito de minério de ferro, esses materiais normalmente tem granulometria silto arenosa e marcada presença de óxidos de ferro (Consoli et al., 2024; Li & Coop, 2019; Wagner et al., 2023). A concentração desses óxidos de ferro costuma ser ainda maior nas partículas mais finas de rejeito, em razão da recuperação de ferro ser mais difícil para partículas menores, o que confere características de comportamento distintas a esses materiais (Yeo et al., 2023). Apesar de apresentarem partículas de tamanhos pequenos, inclusive tamanho argila, os rejeitos de minério de ferro normalmente não apresentam argilominerais em sua composição, diferentemente de solos naturais onde a presença de partículas de tamanho argila está normalmente associada a características mineralógicas específicas.

Portanto, este trabalho busca investigar os efeitos da história de tensões no comportamento de um rejeito de minério de ferro. Para tal, foram realizados ensaios triaxiais em amostras densas submetidas à compressão virgem ou sobreadensadas a um determinado grau de sobreadensamento ($OCR = 2$). A resposta dos ensaios foi avaliada através dos resultados de tensão-deformação e rigidez.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O rejeito de minério de ferro analisado nesta pesquisa é oriundo da região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. A Tabela 1 resume as características do material, enquanto a Fig. 1 apresenta a sua curva granulométrica. A curva granulométrica foi obtida através de peneiramento e sedimentação, seguindo as determinações da norma ASTM D7928 (2021) assim como a determinação das frações granulométricas. Os limites de plasticidade e liquidez foram determinados de acordo com a ASTM D4318 (2017).

Tabela 1. Resumo das características do rejeito de minério de ferro.

Parâmetros	Valores
Densidade específica real dos grãos - G_s	2.92
Pedregulho (%)	0
Areia grossa (%)	2
Areia média (%)	13
Areia fina (%)	57
Silte (%)	22
Argila (%)	6
w_L (%)	-
PI (%)	Não-plástico
Classificação ASTM	SM
Umidade ótima de compactação para energia proctor normal - w_{opt} (%)	12.77
Peso específico aparente seco máximo para energia proctor normal - $\gamma_{d,max}$ (kN/m ³)	18.7

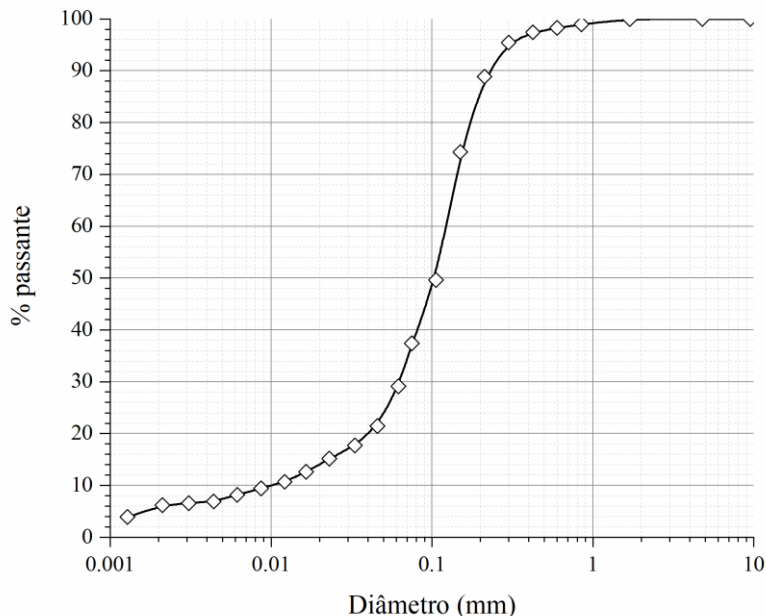


Figura 2. Curva granulométrica do rejeito de minério de ferro.

A Figura 3, por sua vez, apresenta a curva de compactação do material para a energia proctor normal. O rejeito de minério de ferro estudado apresentou umidade ótima (w_{ot}) de aproximadamente 13 % e peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d,max}$) de 19 kN/m³, correspondendo a um índice de vazios (e) de 0.56.

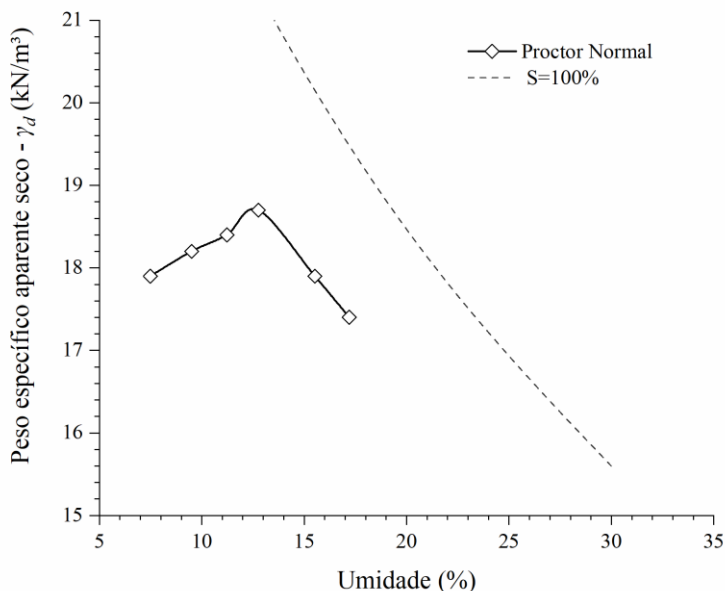


Figura 3. Curva de compactação do rejeito de minério de ferro para energia Proctor normal.

A Tabela 1 traz ainda informações relativas à composição mineralógica do material. Esse é composto majoritariamente de quartzo (64 %) e óxidos de ferro (28%). A quantidade de ferro presente no material está diretamente relacionada ao valor de densidade real dos grãos (G_s) obtido de 2.92, superior ao normalmente observado para areias puras (por volta de 2.70).

2.1.1 Ensaios triaxiais

Foram realizados ensaios triaxiais consolidados isotropicamente e drenados (CID) com tensão de confinamento igual a 50 kPa e seguindo diferentes histórias de tensões. Foram preparadas duas amostras inicialmente densas (grau de compactação 100% da energia normal) através do método de *moist tamping* seguindo as recomendações do método de *undercompaction* (Ladd, 1978). Uma das amostras foi inicialmente carregada até a tensão de confinamento de 200 kPa e então descarregada até a tensão determinada para a realização dos ensaios (50 kPa), tendo assim uma razão de sobreadensamento (p'_{max} / p'_o) igual a 4. Já a outra amostra foi consolidada isotropicamente até a tensão de 50 kPa e então cisalhada.

Os ensaios foram realizados em um equipamento triaxial automatizado do tipo Bishop-Wesley. O equipamento conta com o controle e aquisição de dados totalmente automatizado além de possuir instrumentos para medição local das deformações no corpo-de-prova. Foram utilizados dois sensores axiais diametralmente opostos e um sensor de deslocamento radial, todas os instrumentos de medição local utilizam sensores de efeito hall para determinação dos deslocamentos (Clayton & Khatrush, 1986). A utilização dos sensores de medida local no corpo-de-prova permitiu a avaliação da rigidez do material desde pequenas deformações.

Além disso, todos os ensaios foram realizados em amostras saturadas, seguindo as recomendações da norma ASTM D7181 (2020). Sendo assim, a amostra foi submetida a um processo de saturação que consiste da percolação de CO₂, seguida da percolação com água e saturação por incremento de contrapressão (mantendo uma pressão efetiva de 20 kPa) até que seja atingido um parâmetro B de Skempton maior ou igual a 0.95.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta as trajetórias de compressão seguidas pela amostra sobreadensada durante a etapa de consolidação. É possível observar que a magnitude das deformações volumétricas foi pequena, devido à condição inicial do material e nível de tensões considerado. Além disso, no trecho de descarregamento as deformações foram recuperadas quase em sua totalidade, o que indica um predomínio de comportamento próximo à região elástica para esse material sob essa trajetória e nível de tensões.

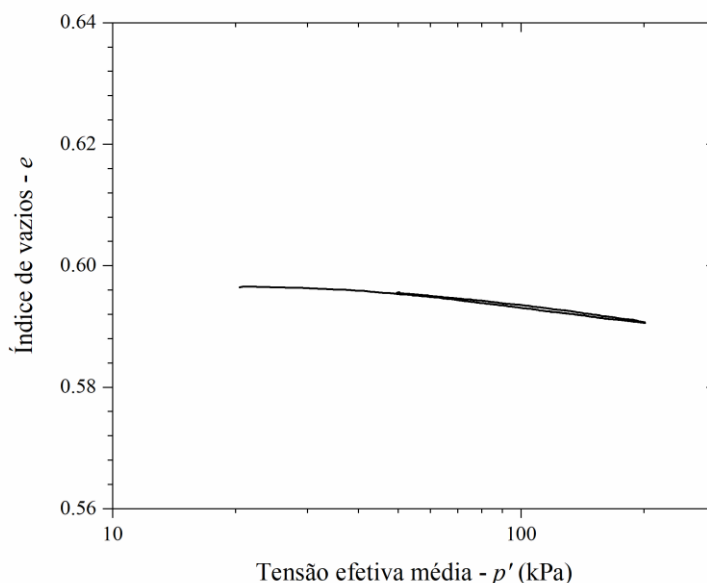


Figura 4. Trajetória de compressão da amostra sobreadensada.

Por sua vez, a Fig. 5 apresenta o comportamento tensão-deformação axial-deformação volumétrica das amostras. As amostras se encontram aproximadamente sob o mesmo índice de vazios após a consolidação (conforme pode ser verificado pela Fig. 4), o que permite comparar diretamente o seu comportamento tensão-

deformação. Apesar de pequenas diferenças que podem ser associadas à variabilidade inerente do material, o comportamento observado é muito semelhante. Ambas os ensaios apresentaram um pico de resistência seguido de um comportamento de *strain-softening*. A resistência de pico atingida também foi muito semelhante em ambos os casos, assim como a rigidez inicial. Em relação ao comportamento de deformação volumétrica, ambas as amostras apresentaram comportamento dilatante com o máximo valor de deformação volumétrica próximo. Além disso, nos dois casos pode ser verificada marcada localização de tensões, associada com a mudança brusca na curva de deformação volumétrica. A principal diferença está na amostra sobreadensada não apresentar contração inicial, enquanto o comportamento da amostra compactada apresenta inicialmente um comportamento contrátil seguido de dilatação. Isso ocorre em razão da amostra sobreadensada já ter experimentado essas deformações na trajetória de tensões a qual foi previamente submetida.

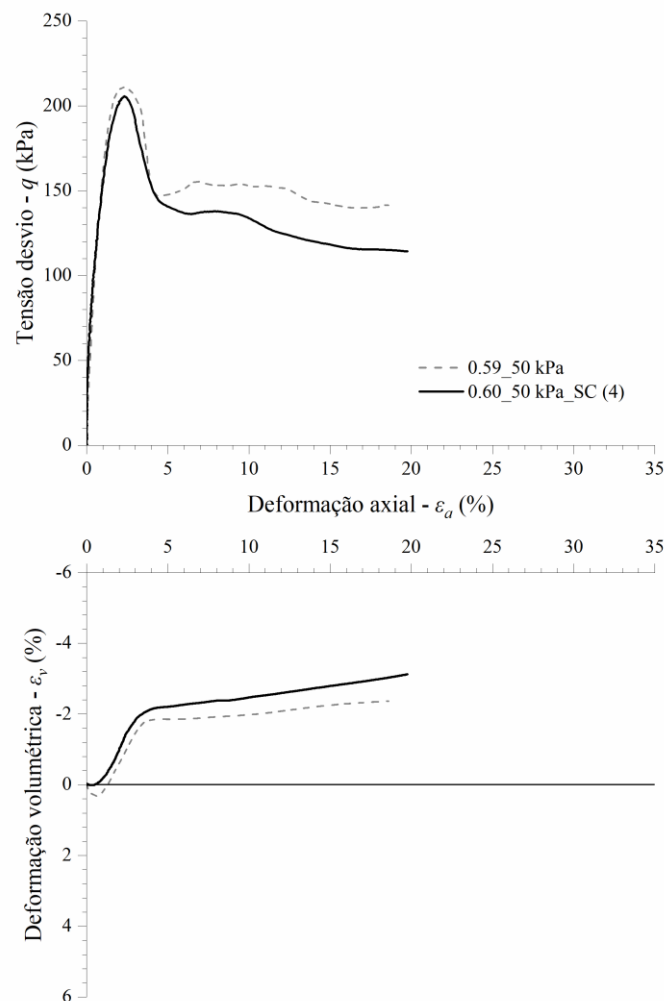


Figura 5. Comportamento tensão desvio – deformação axial – deformação volumétrica de amostra compacta e sobreadensada.

Na Figura 6 é avaliada a influência da história de tensões na rigidez do material através do módulo de elasticidade tangente (E_{tan}). Esse foi calculado através de uma aproximação numérica da diferenciação da curva tensão deformação, através do método da diferença central. É possível verificar que tanto a rigidez inicial

como a degradação da rigidez de ambas as amostras foram praticamente idênticas, ressaltando a pequena influência da história de tensões para o material estudado no nível de tensões avaliado.

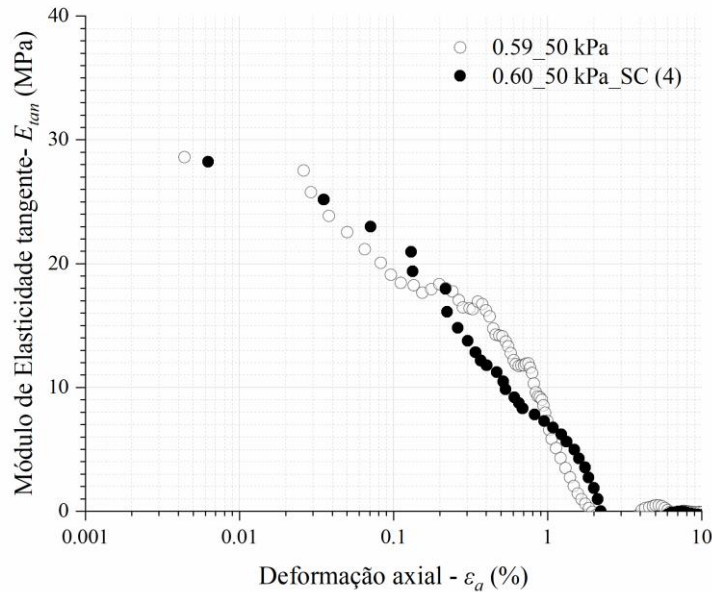


Figura 6. Avaliação da influência da história de tensões na rigidez do rejeito de minério de ferro.

4 CONCLUSÕES

Portanto, a influência da história de tensões no comportamento de rejeito de minério de ferro foi avaliada através da realização de ensaios triaxiais em amostras seguindo diferentes trajetórias de compressão. O comportamento tensão-deformação foi avaliado, bem como a rigidez das amostras. A utilização de sensores de medição local permitiu a avaliação precisa da rigidez desde pequenas deformações. Considerando as limitações da presente pesquisa, é possível concluir que para os níveis de tensão estudados a história de tensões não teve influência no comportamento do rejeito de minério de ferro, apesar de conter partículas de tamanhos silte e argila. Isso se dá em razão das partículas finas existentes na matriz de sólidos dos rejeitos não estarem relacionadas à presença de argilominerais. Sendo assim, o comportamento é predominante friccional e semelhante ao observado para areias e siltes, em que as forças intermoleculares e interações entre partículas costuma ter pequena influência no comportamento macroscópico.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte da VALE, do MEC-CAPES (PROEX) e do CNPq ao grupo de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANM. (2023). Anuário Mineral Brasileiro—Principais substâncias metálicas 2022 (p. 35). Agência Nacional de Mineração.
- ASTM International. (2017). ASTM D4318: *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils*.
- ASTM International. (2020). ASTM D7181: *Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for soils*.
- ASTM International. (2021). ASTM D7928: *Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis*.

- Clayton, C. R. I., & Khatrush, S. A. (1986). A new device for measuring local axial strains on triaxial specimens. *Géotechnique*, 36(4), 593–597.
- Consoli, N. C., Silva, J. P. S., Wagner, A. C., Carvalho, J. V. de A., Baudet, B. A., Coop, M. R., Scheuermann Filho, H. C., Carvalho, I., De Sousa, G. M., & Cacciari, P. P. (2024). Critical state analysis of two compacted filtered iron ore tailings with different gradings and mineralogy at different stages of treatment. *Acta Geotechnica*, 19(2), 881–898.
- Consoli, N. C., Vogt, J. C., Silva, J. P. S., Chaves, H. M., Scheuermann Filho, H. C., Moreira, E. B., & Lotero, A. (2022). Behaviour of Compacted Filtered Iron Ore Tailings–Portland Cement Blends: New Brazilian Trend for Tailings Disposal by Stacking. *Applied Sciences*, 12(2), 836.
- Dauce, P. D., Castro, G. B. de, Lima, M. M. F., & Lima, R. M. F. (2019). Characterisation and magnetic concentration of an iron ore tailings. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 1052–1059.
- Davies, M. (2011). Filtered dry stacked tailings: The fundamentals. Em: *Tailings and Mine Waste Conference*.
- Ladd, R. (1978). Preparing Test Specimens Using Undercompaction. *Geotechnical Testing Journal*, 1(1), 16.
- Li, W., & Coop, M. R. (2019). The Mechanical behaviour of Panzhihua iron tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 56(3), 420–435.
- Lima, R. M. F., Lopes, G. M., & Gontijo, C. de F. (2011). Aspectos mineralógicos, físicos e químicos na flotação catiônica inversa de minérios de ferro de baixos teores, do quadrilátero ferrífero-mg. *Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração*, 8(2), 126–131.
- Morgenstern, N. R., Vick, S. G., Viotti, C. B., & Watts, B. D. (2016). *Report on the Immediate Causes of the failure of the Fundão Dam*. Fundão Tailings Dam Review Panel.
- Resolução nº 4/2019. Estabelece medidas regulatórias cautelares objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado “a montante” ou por método declarado como desconhecido., Pub. L. No. ANM 4/2019, Diário Oficial da União 58 (2019).
- Resolução nº 13/2019. Estabelece medidas regulatórias objetivando assegurar a estabilidade de barragens de mineração, notadamente aquelas construídas ou alteadas pelo método denominado “a montante” ou por método declarado como desconhecido e dá outras providências., Pub. L. No. ANM 13/2019, Edição: 154 Diário Oficial da União 44 (2019).
- Robertson, P. K., de Melo, L., Williams, D. J., & Wilson, G. W. (2019). *Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feijão Dam I*.
- Silva, J. P. S., Rissoli, A. L. C., Cacciari, P. P., Viana Da Fonseca, A. J. P., Scheuermann Filho, H. C., Wagner, A. C., Carvalho, J. V. de A., Festugato, L., & Consoli, N. C. (2024). Triaxial testing response of compacted iron ore tailings considering a broad spectrum of confining pressures. *Soils and Foundations*, 64(2), 101438.
- Wagner, A. C., Silva, J. P. de S., Carvalho, J. V. de A., Rissoli, A. L. C., Cacciari, P. P., Chaves, H. M., Scheuermann Filho, H. C., & Consoli, N. C. (2023). Mechanical behavior of iron ore tailings under standard compression and extension triaxial stress paths. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15(7), 1883–1894.
- Yang, Y., Wei, Z., Fourie, A., Chen, Y., Zheng, B., Wang, W., & Zhuang, S. (2019). Particle shape analysis of tailings using digital image processing. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(25), 26397–26403.
- Yeo, J. Y., Kim, S. Y., & Lee, J.-S. (2023). Compressibility and small strain stiffness characteristics of silt-hematite mixtures. *Engineering Geology*, 325, 107282.