

Análise do comportamento de rejeitos de mineração submetidos a carregamentos de compressão

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

João Pedro Camelo Guedes

Doutorando, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil, joaopguedes99@gmail.com

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: Os rejeitos são subprodutos da extração de minério. Devido aos processos industriais em sua formação, esses materiais apresentam características diferentes dos solos naturais, como por exemplo partículas mais angulares, rugosas e menos esféricas que areias naturais. Além disso, os rejeitos têm sido estudados principalmente em relação a suscetibilidade à liquefação, considerando o material em condições similares a como se encontram nas barragens. No entanto, devido aos acidentes recentes, alterações na legislação proibiram a construção de novas barragens de rejeitos pelo método à montante e demandaram que as existentes sejam descaracterizadas. Dentre as alternativas para disposição de rejeitos, está a disposição dos rejeitos filtrados em pilhas compactadas. Nessas estruturas, os rejeitos são filtrados até próximo do seu teor de umidade ótima e compactados para formar pilhas que podem atingir centenas de metros de altura. Por isso, é necessário investigar o comportamento dos rejeitos sob pressões mais altas do que as estudadas em obras geotécnicas tradicionais. Este trabalho tem como objetivo comparar o comportamento à compressão de rejeitos com diferentes mineralogias até pressões levadas. Para isso, foram realizados ensaios de compressão unidimensional em diferentes rejeitos. Verificou-se que, para os rejeitos e para a faixa de tensões testadas, uma linha única de compressão normal não pôde ser alcançada, demonstrando a dependência do comportamento da condição de compactação em campo.

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

ABSTRACT: Tailings are the by-products of ore exploitation. Due to the industrial processes involved in their obtention, tailings usually have characteristics distinct from natural soils, e.g. tailings particles are rougher, more angular, and less spherical than natural sands. Besides, tailings have been studied mainly focusing on susceptibility to liquefaction, with the materials in conditions close to how they are usually found in tailings dams. However, changes to the legislation were made due to the recent disasters, prohibiting the construction of new tailings dams by upstream raising and demanding the existing ones to be decommissioned. The stacking of compacted filtered tailings is amongst the alternatives for tailings disposal. In the stacks, tailings are filtered up to moisture contents close to their optimum moisture content and compacted to form stacks that may achieve hundreds of meters in height. As a reason, it is mandatory to investigate the behavior of tailings under stresses higher than those studied for conventional geotechnical structures. This paper aims to compare the behavior under one-dimensional compression for different tailings. It was observed that for the tailings and range of pressures studied, a unique normal compression line was not achieved, demonstrating the on-field tailings' dependence on the initial conditions.

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

1 INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade econômica essencial, em especial para países subdesenvolvidos. Nessa atividade os depósitos minerais são explorados a fim de extrair os minerais de interesse. Durante o processo, dependendo do mineral e do depósito, são necessários processos de beneficiamento a fim de melhorar a qualidade e aumentar a concentração do minério, separando o produto com valor econômico dos minerais de ganga. Os subprodutos do beneficiamento de minérios são chamados de rejeitos de mineração. No Brasil, a exploração de minério de ferro é uma atividade econômica fundamental, sendo a região do Quadrilátero Ferrífero a principal produtora (mais de 60% da produção nacional de minério de ferro). Os minérios encontrados nessa região são majoritariamente de baixa concentração, ou seja, os processos de beneficiamento são mandatórios (Dauce et al., 2019).

Até o ano de 2019, os rejeitos gerados da exploração de minério de ferro eram dispostos principalmente em barragens. No entanto, acidentes envolvendo essas estruturas (Morgenstern et al., 2016; Robertson et al., 2019) induziram o estabelecimento de restrições à utilização de barragens alteadas à montante no país e incitaram a busca por novas alternativas de disposição. Uma das alternativas é a disposição de rejeitos filtrados e compactados em pilhas. Os rejeitos normalmente são classificados de acordo com a sua concentração de sólidos em diferentes categorias: em lama, em pasta, filtrados. Os rejeitos filtrados são aqueles em que o teor de sólidos é superior à 85% (Ulrich, 2019). Sendo assim, os rejeitos precisam passar por um processo de filtração para redução da sua umidade após o processo de beneficiamento. Os rejeitos são então filtrados até teores de umidade próximos à sua umidade de compactação e compactados em pilhas de forma a se obter uma estrutura estável.

A adoção da disposição de rejeitos filtrados em pilhas é crescente desde as primeiras implementações na década de 1990 (Davies et al., 2010). No entanto, essas estruturas costumavam ser construídas em regiões desérticas e afastadas, tendo poucos relatos de estruturas construídas em regiões de clima tropical com regimes de chuvas diferenciados. Além disso, a implementação da disposição de rejeitos filtrados costuma ter um custo superior ao de dispor o material em barragens, ainda que o custo total considerando a operação e o fechamento da estrutura sejam inferiores para o caso de pilhas (Furnell et al., 2022).

Outro aspecto é o foco do estudo de rejeitos de mineração para os casos de liquefação. Em razão desses materiais serem normalmente areias siltosas ou siltes arenosos e a susceptibilidade à liquefação ser verificada em casos históricos, inclusive nos acidentes ocorridos no Brasil, os estudos envolvendo esses materiais acabaram sendo mais relacionados a esse tópico (e.g., Bedin et al., 2012; Carrera et al., 2011; Schnaid et al., 2013). Outra razão para o foco no estudo em liquefação é que os rejeitos se encontravam em estados fofos e saturados quando dispostos nas barragens. No entanto, com o intuito de aprofundar os conhecimentos para o desenvolvimento de novas estruturas de disposição que sejam mais seguras é preciso investigar também os rejeitos em condições compactadas para aplicação em pilhas (Consoli et al., 2022, 2024; Wagner, Carvalho, et al., 2023; Wagner, Silva, et al., 2023).

Dessa forma, o presente artigo busca avaliar o comportamento de rejeitos de mineração submetidos a carregamentos oedométricos até pressões maiores que as usualmente consideradas. O objetivo é simular a condição *in-situ* que ocorre durante o aumento de altura das pilhas. Para tal foram realizados ensaios de adensamento unidimensional em amostras de três rejeitos diferentes inicialmente sob duas condições distintas de moldagem, fofa e densa.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Os rejeitos de mineração estudados são provenientes da extração de minério de ferro na região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. A Figura 1 apresenta a curva granulométrica dos rejeitos de mineração estudados. Nessa figura, são apresentadas as curvas granulométricas obtidas a partir de dois diferentes métodos, peneiramento e sedimentação, seguindo as recomendações da ASTM D7928 (2021), e através de análise de imagem utilizando o software ImageJ. É possível observar que, apesar das diferenças inerentes aos diferentes métodos considerados foi obtida boa concordância entre os resultados. É importante

ressaltar que as diferenças são esperadas dado que cada um dos métodos faz considerações próprias e não necessariamente equivalentes (Vilhar et al., 2013).

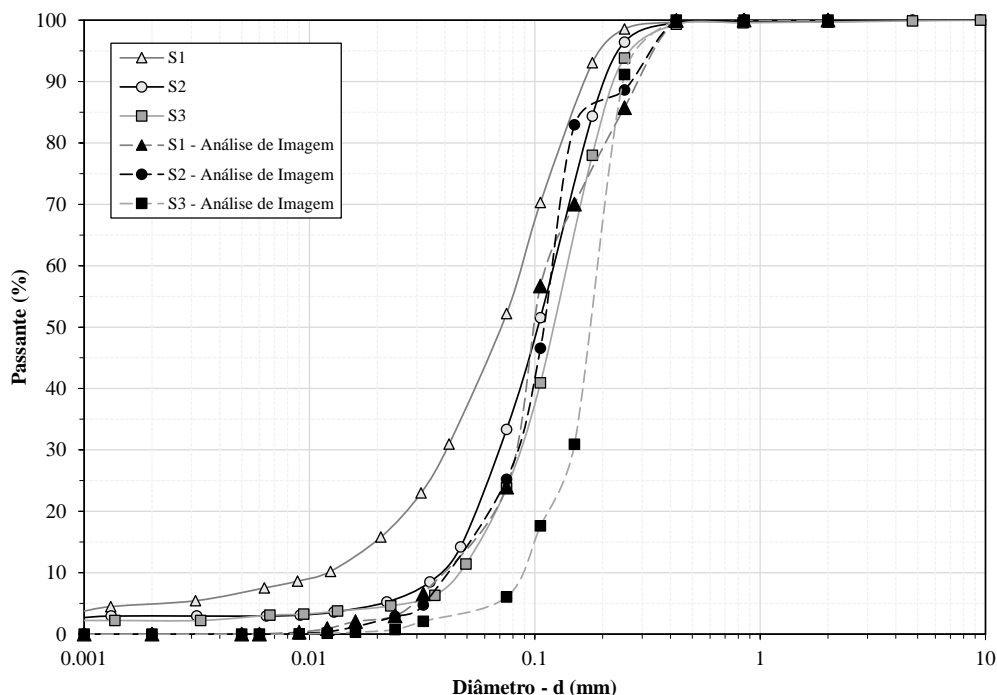


Figura 1 – Curva granulométrica dos rejeitos estudados através de peneiramento e sedimentação e através de análise de imagem.

Por sua vez, a Figura 2 apresenta as curvas de compactação obtidas para os materiais para as energias Proctor normal e modificado. A Tabela 1 resume as características dos materiais.

Tabela 1 – Características dos rejeitos estudados.

Parâmetros	S1	S2	S3
Densidade específica dos grãos – G_s	3.05	2.97	2.84
Pedregulho (%)	0.00	0.00	0.00
Areia grossa (%)	0.27	0.07	0.18
Areia média (%)	0.04	0.34	0.39
Areia fina (%)	47.48	66.25	75.51
Silte (%)	47.26	30.41	21.60
Argila (%)	4.95	2.93	2.21
w_L (%)	-	-	-
PI (%)	Non-plastic	Non-plastic	Non-plastic
ASTM-USCS Classification	ML	SM	SM
Índice de vazios máximo – e_{max}	1.28	0.99	0.94
Índice de vazios mínimo – e_{min}	0.36	0.36	0.37
Umidade ótima para energia Proctor Normal – w_{opt} (%)	11.50	14.30	14.24

Peso específico aparente seco máximo para energia Proctor Normal – γ_{dmax} (kN/m ³)	19.30	18.06	17.75
Umidade ótima para energia Proctor Modificado – w_{opt} (%)	10.00	14.82	17.41
Peso específico aparente seco máximo para energia Proctor modificado – γ_{dmax} (kN/m ³)	20.20	17.62	19.30

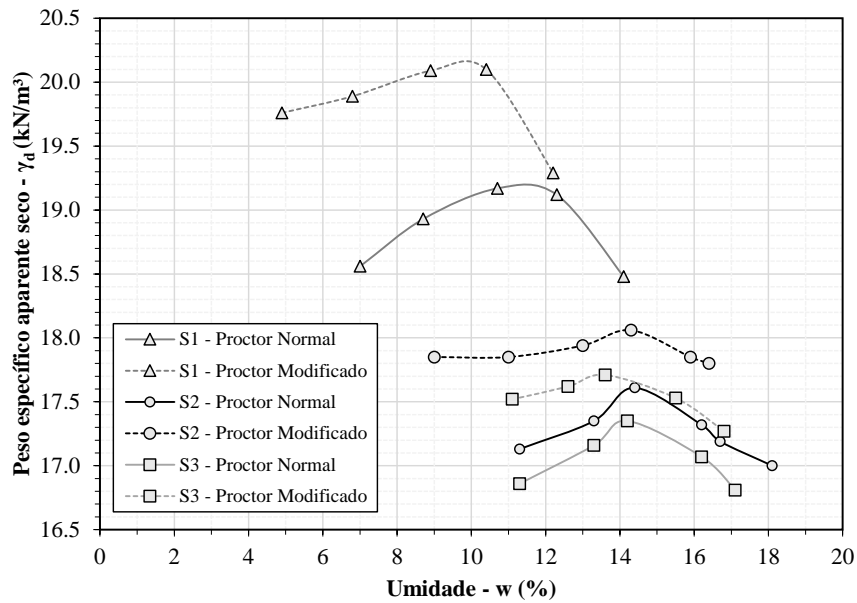


Figura 2 – Curvas de compactação para energia normal e modificada.

Além disso os rejeitos foram avaliados do ponto de vista mineralógico (Fig. 3) e morfológico (Tab. 2). Para a análise mineralógica foi utilizado o equipamento QEMSCAM que permite uma análise quantitativa dos minerais constituintes enquanto a análise de imagem foi realizada a partir da análise de imagens de microscopia eletrônica de varredura utilizando o software ImageJ.

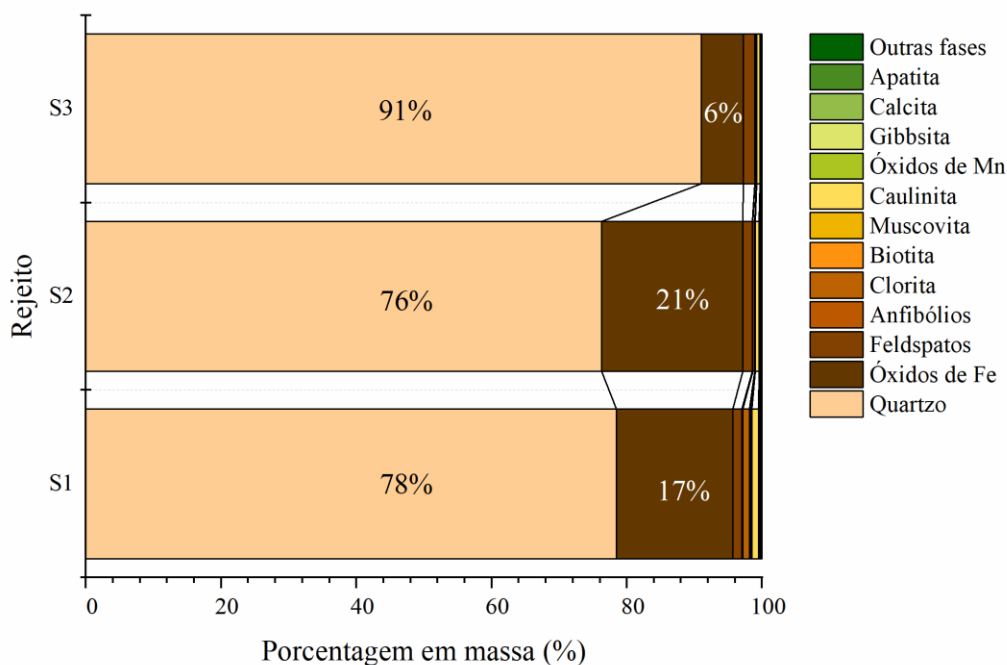


Figura 3 – Mineralogia dos rejeitos estudados.

Tabela 2 – Formato das partículas dos materiais a partir de análise de imagem.

Rejeito	Índice	Convexidade	Esfericidade	Regularidade
	aspecto			
	<i>AR</i>	<i>C</i>	<i>S</i>	<i>OR</i>
S1	0.54	0.69	0.42	0.55
S2	0.63	0.87	0.69	0.73
S3	0.55	0.74	0.42	0.57

2.1.1 Ensaios oedométricos

Os ensaios oedométricos foram realizados em amostras de 2cm de altura por 5cm de diâmetro. As amostras foram preparadas em duas condições iniciais (75% do grau de compactação para energia normal e 100% do grau de compactação para energia modificada) através de compactação estática. Todos os ensaios foram realizados em amostras previamente inundadas em estágios até a tensão de 6400 kPa. A razão de incremento entre estágios foi de 2 (a carga foi duplicada a cada estágio).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 apresenta os resultados dos ensaios oedométricos com cada um dos rejeitos nas duas condições de moldagem.

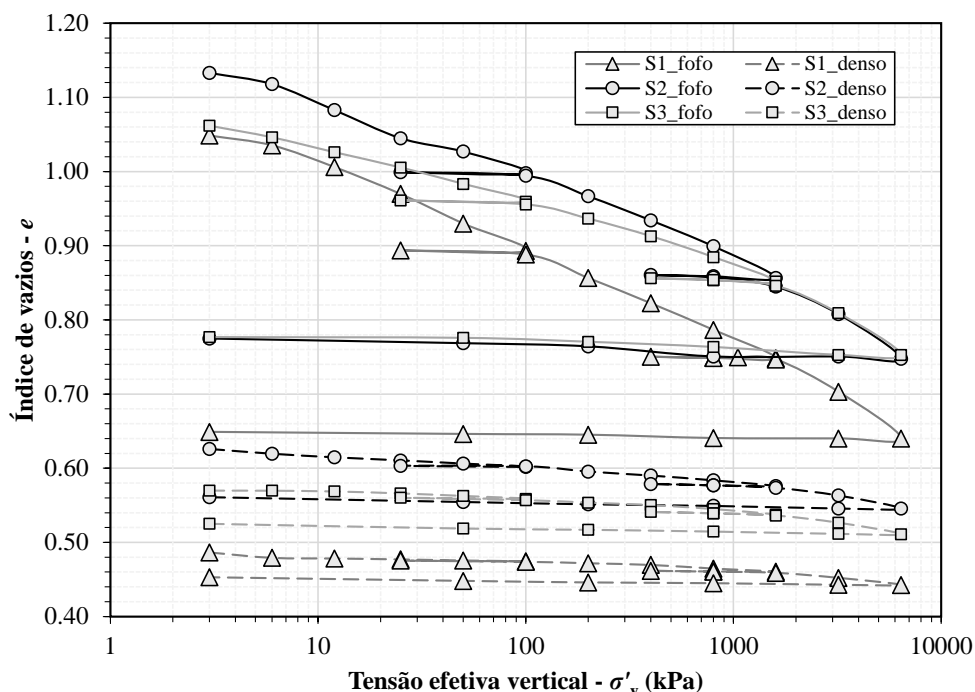


Figura 4 – Resultados de ensaios de compressão oedométrica para rejeitos de mineração.

A figura mostra que para os rejeitos estudados e nível de tensão avaliado, não foi atingida uma linha de compressão normal (LCN) única. Em argilas, normalmente obtém-se uma rápida convergência entre as curvas para materiais fofos e densos, seguindo uma mesma LCN. Já para areias a convergência é retardada, ocorrendo muitas vezes apenas sob elevadas pressões, onde a quebra de grãos é o mecanismo de deformação predominante (Consoli et al., 2005, 2007). Esses resultados concordam com o observado por Consoli et al. (2024) em que os rejeitos estudados apresentaram convergência apenas sobre altas tensões, da ordem de 100 MPa, muito superiores àquelas esperadas para ocorrer em campo. Essa falta de convergência também está associada a angularidade das partículas, mineralogia mista e diferentes teores de finos que influenciam diretamente na estrutura criada quando os rejeitos são compactados em diferentes energias.

Foi avaliada também a compressibilidade dos materiais, através da avaliação dos coeficientes de compressão e de descarga obtidos nos ensaios oedométricos (Tab. 3). Na condição fofa, o rejeito S1 que é o rejeito com maior teor de finos apresentou a maior compressibilidade entre os rejeitos estudados. Já na condição densa, o rejeito S1 apresentou a menor compressibilidade dentre os demais, indicando a formação de uma estrutura mais estável devido o preenchimento dos vazios pela maior presença de finos. Além disso os coeficientes de descarga entre todos os materiais foram muito semelhantes.

Em relação à ocorrência de quebra de grãos, é esperado que sob a magnitude de tensões avaliadas não seja obtida ainda uma quebra significativa, com base no observado para outros rejeitos de minério de ferro (Consoli et al., 2024; Wagner, Carvalho, et al., 2023). A quebra de partículas nesses casos pode estar mais relacionada à mudança na morfologia das partículas devido a sua natureza (Carvalho et al., 2024; Silva et al., 2024).

Tabela 3 – Parâmetros de compressibilidade de rejeitos de minério de ferro.

Ensaio	Índice de vazios inicial	Índice de compressibilidade	Índice de Descarga
	e_0	C_c	C_r
S1_fofo	1.05	0.121	0.006
S2_fofo	1.13	0.112	0.007
S3_fofo	1.06	0.102	0.008
S1_denso	0.49	0.015	0.002

S2_denso	0.63	0.034	0.005
S3_denso	0.57	0.031	0.006

4 CONCLUSÕES

Este artigo avaliou o comportamento de rejeitos de minério de ferro submetidos a carregamentos de compressão unidimensional. Os rejeitos estudados apresentaram mineralogia semelhante devido a sua origem comum e majoritariamente composta de quartzo e óxidos de ferro. Além disso, os rejeitos apresentaram partículas angulares, rugosas e pouco esféricas, que são características desses materiais em razão de sua natureza clástica e antrópica. Em relação à compressão unidimensional, não foi obtida uma linha de compressão normal única para nenhum dos rejeitos até o nível de tensões estudado. Logo, seriam necessárias pressões mais elevadas para atingir a convergência entre ensaios fofos e densos, maiores do que as usualmente atingidas na construção de pilhas. Sendo assim, os resultados reforçam a dependência do comportamento dos materiais na sua condição inicial de disposição no campo sendo necessárias pressões muito superiores às previstas para ocorrerem para que tivessem um comportamento único. Em relação à compressibilidade dos materiais, o rejeito com o maior teor de finos foi o que apresentou maior compressibilidade na condição fofa e menor compressibilidade quando densificado.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM International (2021). ASTM D7928: *Standard test method for particle-size distribution (gradation) of fine-grained soils using the sedimentation (hydrometer) analysis*.
- Bedin, J., Schnaid, F., Da Fonseca, A. V., & Costa Filho, L. D. M. (2012). Gold tailings liquefaction under critical state soil mechanics. *Géotechnique*, 62(3), 263–267.
- Carrera, A., Coop, M. R., & Lancellotta, R. (2011). Influence of grading on the mechanical behaviour of Stava tailings. *Géotechnique*, 61(11), 935–946.
- Carvalho, J. V. de A., Wagner, A. C., Scheuermann Filho, H. C., & Consoli, N. C. (2024). The role of fabric, stress history, mineralogy, and particle morphology on triaxial behavior of non-textbook geomaterials. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.
- Consoli, N. C., Casagrande, M. D., & Coop, M. R. (2005). Effect of Fiber Reinforcement on the Isotropic Compression Behavior of a Sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(11), 1434–1436.
- Consoli, N. C., Heineck, K. S., Coop, M. R., da Fonseca, A. V., & Ferreira, C. (2007). Coal Bottom Ash as a Geomaterial: Influence of Particle Morphology on the Behavior of Granular Materials. *Soils and Foundations*, 47(2), 361–373.
- Consoli, N. C., Silva, J. P. S., Wagner, A. C., Carvalho, J. V. D. 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, 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., Lupo, J., Martin, T., McRoberts, E., Musse, M., & Ritchie, D. (2010). Dewatered tailings practice—Trends and observations. Em *Tailings and Mine Waste (Org.), Tailings and Mine Waste 2010*. CRC Press.
- Furnell, E., Bilaniuk, K., Goldbaum, M., Shoaib, M., Wani, O., Tian, X., Chen, Z., Boucher, D., & Bobicki, E. R. (2022). Dewatered and Stacked Mine Tailings: A Review. *ACS ES&T Engineering*, 2(5), 728–745.
- 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.
- 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*.
- 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.
- 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.
- Ulrich, B. (2019). *Practical thoughts regarding filtered tailings*. 71–79.
- Vilhar, G., Jovičić, V., & Coop, M. R. (2013). The role of particle breakage in the mechanics of a non-plastic silty sand. *Soils and Foundations*, 53(1), 91–104.
- Wagner, A. C., Carvalho, J. V. de A., Silva, J. P. S., Scheuermann Filho, H. C., & Consoli, N. C. (2023). Dry stacking of iron ore tailings: Possible particle breakage during compaction. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, Ahead of print, 1–23.
- 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.