

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

Caracterização Hidráulica de um Rejeito de Minério de Ferro

Fabio Pontuschka Gonçalves

Orientador: Prof. Dr. Fernando A. M. Marinho (IGc – USP)

Dissertação de Mestrado

Programa de Pós – Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO

2023

RESUMO

Os acidentes envolvendo barragens de rejeitos ao redor do mundo, inclusive no Brasil (Mariana (MG) em 2015 e Brumadinho (MG) em 2019) tem levado a indústria da mineração a utilizar alternativas para as barragens. Dentre os métodos que estão sendo utilizados é o empilhamento de rejeitos filtrados. Esse processo reduz o risco de liquefação pois além de se ter um material compactado, ele deve em geral se manter na condição não saturada. Este trabalho apresenta uma caracterização hidráulica de dois rejeitos filtrados de ferro (rejeito de Mina de Abóboras e rejeito de PDER-Cianita). A caracterização foi feita com a determinação das curvas de retenção de água e determinação da condutividade hidráulica dos materiais, com uso de infiltrômetro em laboratório, sob diversas condições de compactação. As condições de compactação variaram em termos de energia de modo a obter materiais com densidades usuais e, também, com baixas densidades e, portanto, potencialmente sujeitos a liquefação quando saturados. Os dois rejeitos estudados se mostraram muito semelhantes do ponto de vista granulométrico, mas apresentaram características de geometria de grãos diferentes, inferidas por meio de MEV. As características dos materiais diferiram nas curvas de compactação e nas curvas de retenção de água. A observação da baixa capacidade de retenção de água perto da saturação levou a um estudo paralelo para desenvolver uma metodologia para congelar amostras liquefeitas em ensaios triaxiais sem a necessidade de levar a câmara ao congelador. Essa metodologia permite obter o índice de vazios por meio da determinação acurada do teor de umidade ao final do ensaio.

Palavras-chave: rejeitos filtrados, curva de retenção de água, infiltrômetro, sucção.

ABSTRACT

Accidents involving tailings dams around the world, including in Brazil (Mariana (MG) in 2015 and Brumadinho (MG) in 2019) have led the mining industry to use alternatives for dams. Among the methods being used is the stacking of filtered tailings. This process reduces the risk of liquefaction because in addition to having a compacted material, it must generally remain in an unsaturated condition. This work presents a hydraulic characterization of two filtered iron tailings (Aboboras mine tailings and PDER-Cianita tailings). The characterization was carried out by determining the water retention curves and determining the hydraulic conductivity of the materials, using an infiltrometer in the laboratory, under different conditions of compaction. Compaction conditions varied in terms of energy to obtain materials with usual densities and with low densities and therefore potentially subject to liquefaction when saturated. The two tailings studied were very similar from a granulometric point of view, but presented different grain geometry characteristics, inferred by means of SEM. The characteristics of the materials differed in the compaction curves and in the water retention curves. The observation of the low water holding capacity close to saturation led to a parallel study to develop a methodology to freeze liquefied samples in triaxial tests without the need to take the triaxial cell to the freezer. This methodology allows obtaining the void index by means of the accurate determination of the moisture content at the end of the test.

Keywords: filtered waste, water retention curve, infiltrometer, suction,

1. Introdução

A mineração é base da cadeia produtiva de todos os setores da economia mundial. Com o aumento populacional somado ao avanço tecnológico, há cada vez mais a necessidade, nos últimos anos, de matérias – primas oriundas da mineração. Para acompanhar esta demanda, depósitos de menor teor estão sendo explorados, gerando, assim, um volume maior de rejeitos de mineração.

O mau gerenciamento de rejeitos pode acarretar consequências trágicas, haja vista os acidentes envolvendo rompimentos das barragens de Fundão, em Mariana (MG), em 2015, e Mina do Feijão, em Brumadinho (MG), em 2019. Estes acidentes aumentaram a cobrança da população sobre instituições governamentais e empresas por um melhor gerenciamento e novas formas de disposição de rejeitos. Desta forma, novos licenciamentos para construções de novas barragens foi dificultado, levando, então à procura e desenvolvimento de métodos que apresentem menor risco à população.

Neste contexto, o empilhamento de rejeitos filtrados surge como alternativa. Esta técnica consiste na retirada de água dos rejeitos através de filtração, até a condição não saturada, permitindo a compactação dos rejeitos de modo a garantir a sua estabilidade. Os empilhamentos são mais flexíveis em termos de local, embora, da mesma forma que as barragens necessitem de uma fundação adequada e considerações sobre infiltração e sistema de drenagem. Deve-se destacar ainda que como a presença de água é menor, o processo de compactação gera uma maior densidade dos rejeitos, assim, os riscos de liquefação diminuem, embora não desapareçam. Davies (2011) destaca que outro motivo para adotar o empilhamento de rejeitos filtrados é o aproveitamento da água que em locais áridos é um bem escasso, pois a filtração permite a reutilização da água no beneficiamento. Estas pilhas também são utilizadas em locais onde a morfologia do terreno dificulta a construção de barragens. Há, portanto, uma combinação de fatores que tornam o empilhamento de rejeitos filtrados uma solução atrativa, mesmo considerando seu eventual custo mais elevado.

Segundo Davies (2011) desde a década de 1990, há um aumento expressivo no uso de pilhas de rejeitos filtrados. Países como o Chile, Austrália, Canadá, Estados Unidos e México estão os que mais utilizam a técnica (Ulrich & Coffin, 2013). No Brasil, também é uma técnica em crescimento. Alves (2020), mostra alguns empreendimentos, como a Mina Pau Branco (MG) e Mina Casa de Pedra (MG), que estão abandonando o uso de barragens para utilizar apenas o empilhamento de rejeitos filtrados.

Neste cenário de crescimento e desenvolvimento de rejeitos filtrados, estudos mais aprofundados se fazem necessários. Portanto, este trabalho tem por objetivo a caracterização hidráulica de rejeitos filtrados de minério de ferro. Os rejeitos são oriundos da Mina Abóboras e PDER – Cianita, pertencentes à VALE S.A., em Minas Gerais.

Pretende-se avaliar a condutividade hidráulica e as curvas de retenção de água do rejeito diante de diferentes condições de densidade seca e teor de umidade. Serão realizados ensaios de permeabilidade utilizando um infiltrômetro e análises de curvas de retenção, obtidas pelo método do papel filtro, para diversas condições de compactação do rejeito. Em paralelo a este estudo foi desenvolvido um processo de congelamento para determinar o índice de vazios final de corpos de prova.

2. Conclusões

Considerando os estudos realizados é possível apresentar as seguintes conclusões:

- Embora com uma granulometria muito fina, indicando até 8% de partículas de dimensão de argila, os dois materiais ensaiados se apresentaram como não plástico.
- A densidade dos grãos obtidas apresentaram valores médios elevados, 3,59g/cm³ para o rejeito Abóboras e 3,47 g/cm³ para PDE – Cianita). Estes valores se justificam pela presença de minerais de ferro em sua composição, como hematita e goethita.
- A análise das imagens do microscópio de varredura (MEV) indica que os grãos do rejeito de Mina de Abóboras apresentam grãos de forma prismática e placoide, com baixa esfericidade e angulosos a sub-angulosos. Já o rejeito de PDER – Cianita, os grãos possuem forma cúbica como majoritária, com maior arredondamento e esfericidade do que o rejeito de Mina de Abóboras, com grãos variando de sub-angulosos a sub-arredondados.
- Embora as curvas granulométricas dos dois materiais sejam semelhantes o rejeito Cianita apresentou: menor densidade seca máxima, menor grau de saturação no ponto ótimo. Esses aspectos podem ser um reflexo da forma dos grãos.
- Os pontos ótimos das curvas de compactação do rejeito de Mina de Abóboras estão entre 80% e 90% de saturação, enquanto, para PDER-Cianita, entre 50% e 60%.

- O limite de umidade de transporte (TML) para o rejeito de Mina de Abóboras, compactado na energia de Proctor-Fagerberg é de 11,6%. Já compactado na energia de Proctor-Fagerberg Modificado é de 14,2%. O TML para o rejeito de PDER-Cianita, para Proctor-Fagerberg é de 15%. E para Proctor-Fagerberg Modificado é de 18,5%. É importante chamar atenção sobre o significado do TML para avaliar liquefação, e o risco envolvido em utilizar apenas esse índice para avaliar a liquefação. Os comportamentos mecânicos dos dois rejeitos devem ser avaliados.
- Ambos os rejeitos possuem condutividade hidráulica baixa (variações entre 10^{-7} m/s a 10^{-9} m/s).
- A análise do parâmetro n permite inferir que, para o rejeito de Mina de Abóboras, há pouca variação entre as amostras de Proctor Normal e Proctor-Fagerberg, entretanto, estas apresentam valores de n um pouco maiores. Já em relação ao rejeito de PDER-Cianita, com exceção às amostras teor de umidade ótimo, que apresentam valores de n similares, as amostras de Proctor Normal possuem valores de n superiores às de Proctor-Fagerberg. É necessário um maior número de dados experimental, principalmente para baixos valores de sucção.
- Analisando o parâmetro α , pode-se indicar que há grande variação entre os valores das amostras de Proctor Normal e Proctor-Fagerberg para ambos os rejeitos, permitindo inferir que a densidade influencia fortemente o parâmetro α .
- As faixas de sucção aproximadas, ajustadas para as curvas de compactação de ambos os rejeitos, parecem seguir a mesma tendência, em que a faixa de 50 kPa está em torno dos 8% a 9% de umidade, a de 20 kPa em 10,5% a 11% e a de 10 kPa em torno de 12% a 13%. A faixa de 5 kPa de sucção está em torno de 15% de teor de umidade para o rejeito de Mina de Abóboras, mas para o rejeito de PDER-Cianita, abaixo dos 10 kPa, são necessários mais dados experimentais para esta delimitação
- As faixas aproximadas de mesmo valor de condutividade hidráulica saturada (k_{sat}) sugerem que, os valores de k_{sat} para os corpos de prova que não sofreram infiltração via método do infiltrômetro, podem ser a partir da ordem de 10^{-10} m/s. São necessárias maiores investigações nestes ensaios para melhor definição das faixas de k_{sat} .
- O processo de congelamento de corpos de prova liquefeitos em ensaios triaxiais demonstrou-se eficiente e prático.

3. Referências Bibliográficas

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-6459: Solo – Determinação do Limite de Liquidez. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984, 6 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-6508: Grãos de Solo que Passam na Peneira de 4,8 mm – Determinação da Massa Específica. Método de Ensaio. Rio de Janeiro. 1984, 8 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-7180: Solo – Determinação do Limite de Plasticidade. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984, 3 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-7181: Solo - Análise Granulométrica. Método de Ensaio. 1984, 13 p.
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR-7182: Solo – Ensaio de Compactação. Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1986, 10 p.
- Alves, P. I. A. (2020). Empilhamento De Rejeito Filtrado: a Expansão De Uma Alternativa Para Substituição De Barragens. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto.
- Bella, G. (2021). Water retention behaviour of tailings in unsaturated conditions. *Geomechanics and Engineering*, 26(2), 117–132.
- Cai, G., Zhou, A. & Sheng, D. (2013). Permeability function for unsaturated soils with different initial densities. *Canadian Geotechnical Journal*, 51(12).
- Cao, B., Tian, Y., Gui, R. & Liu, Y. (2021). Experimental Study on the Effect of Key Factors on the Soil–Water Characteristic Curves of Fine-Grained Tailings. *Frontiers in Environmental Science*, 9(August), 1–8.
- Correia, G. F. (2019). Bauxite mining and shipping: transportable moisture limit (TML) tests and further cargo assessments for safe shipping. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo.
- Davies, M. (2011). Filtered dry stacked tailings: the fundamentals. *Proceedings Tailings and Mine Waste 2011*, Vancouver B.C., 9 p.
- Davies, M., Lupo, J., Martin, T., McRoberts, E., Musse, M. & Ritchie, D. (2010). Dewatered tailings practice - Trends and observations. *Tailings and Mine Waste'10 - Proceedings of the 14th International Conference on Tailings and Mine Waste*, March 2020, 133–142.
- Decagon Devices; METER Group. (2007) Mini Disk Infiltrometer—User's Manual, 6ª versão; Decagon Devices, Inc.: Pullman, Washington, EUA.
- Dedavid, B. A., Gomes, C. I., & Machado, G. (2007). Microscopia eletrônica de varredura: aplicações e preparação de amostras: materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. EdiPUCRS.
- Fagerberg, B., & Stavang, A. (1971). Determination of critical moisture contents in ore concentrates carried in cargo vessels. *Minerals Transportation*, 174-191.
- Fleureau, J. M., Verbrugge, J. C., Huergo, P. J., Correia, A. G., & Kheirbek-Saoud, S. (2002). Aspects of the behaviour of compacted clayey soils on drying and wetting paths. *Canadian geotechnical journal*, 39(6), 1341-1357.
- Fredlund, D.G.; Rahardjo, H. & Fredlund, M. (2012). *Unsaturated Soil Mechanics and Geotechnical Engineering Practice*, Wiley, New York. 926p.

- Ferreira, R. F. (2019). Modelos para previsão do limite de umidade para transporte marítimo de finos de minério de ferro-TML. Tese de Doutorado. Universidade de Ouro Preto.
- Gao, Y. & Sun, D. (2017). Soil-water retention behavior of compacted soil with different densities over a wide suction range and its prediction. *Computers and Geotechnics*, 91.
- Gorakhki, M. H., Bareither, C. A., Scalia, J. & Jacobs, M. (2019). Hydraulic Conductivity and Soil Water Retention of Waste Rock and Tailings Mixtures.
- Klohn Crippen Berger; The Mining Association of Canada. (2017). Study of Tailings Management Technologies. Mine Environment Neutral Drainage Project, October, 1–164.
- Lupo, J. & Hall, J. (2011). Dry stack tailings - Design considerations. *Tailings and Mine Waste'10 - Proceedings of the 14th International Conference on Tailings and Mine Waste*, 327–334.
- Marinho, F. A., & Stuermer, M. M. (1998). Aspects of the storage capacity of a compacted residual soil. *UNSAT'98. Proceedings of the First International Conference on Unsaturated Soils. China. Vol 1.* 581-585.
- Marinho, F.A.M. & Oliveira, O. M. (2006). The Filter Paper Method Revisited. *Geotechnical Testing Journal*, 29(3), 250–258.
- Marinho, F. A. M., & Stuermer, M. M. (2000). The influence of the compaction energy on the SWCC of a residual soil. In *Advances in unsaturated geotechnics* (pp. 125-141).
- Marinho, F. A., & Oliveira, O. M. (2012). Unconfined shear strength of compacted unsaturated plastic soils. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 165(2), 97-106.
- Mualem, Y. (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water resources research*, 12(3), 513-522.
- Oldecop, L. A. & Rodari, G. J. (2021). Unsaturated mine tailings disposal. *Soils and Rocks*, 44(3), 1–12.
- Sepúlveda, R. G., Robert, E. S. & Camacho-Tauta, J. (2022). Assessment of the Self-Compaction Effect in Filtered Tailings Disposal under Unsaturated Condition. *Minerals*, 12(4), 1–18.
- Ulrich, B. & Coffin, J. (2013). Considerations for tailings facility design and operation using filtered tailings. *Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, 2003*, 201–210.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil science society of America journal*, 44(5), 892-898.
- Van Genuchten, M. Th., F. J. Leij, and S. R. Yates. (1991). *The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils, Version 1.0.* EPA Report 600/2-91/065, U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS, Riverside, California

