

Desafios na Descaracterização de Barragens: variabilidade de rejeitos

João Vítor de Azambuja Carvalho

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

Alexia Cindy Wagner

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

Hugo Carlos Scheuermann Filho

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

Thatyane Martins Gonçalves

Engenheira geotécnica sênior, Vale S. A., Santa Luzia-MG, thatyane.goncalves@vale.com

Nilo Cesar Consoli

Professor titular, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, consoli@ufrgs.br

RESUMO: O grande volume de material armazenado, somado às variabilidades intrínseca e de disposição (ao longo do reservatório) dos rejeitos de mineração, explicam a complexidade relacionada às etapas de concepção, operação e fechamento de barragens de rejeito de mineração. Isto é, esses aspectos dificultam a obtenção de parâmetros de comportamento representativos do material depositado e, assim, prejudicam a compreensão do seu comportamento. Tais inconvenientes são acentuados nas barragens alteadas pelo método à montante: os diques de alteamento são assentados sobre o rejeito depositado, o qual eventualmente encontra-se em estado fofo e saturado. Nesse contexto, a fim de ampliar a segurança da atividade mineradora brasileira, introduziram-se novas regulamentações proibindo a construção de estruturas desse tipo e demandando o fechamento das já existentes. No entanto, o processo de desativação envolve novos desafios em face da ausência tanto de procedimentos normativos específicos como do registro adequado relativos ao projeto original e suas alterações ao longo da operação da barragem. Ademais, essas estruturas podem não ter sido concebidas para as solicitações decorrentes da remoção de material envolvidas na descaracterização. Portanto, a caracterização dos rejeitos *in situ* é essencial à garantia de êxito nos processos de descaracterização de barragens à montante. Assim, o presente trabalho avalia a variabilidade existente nos rejeitos dispostos em uma barragem que será descaracterizada por meio de sete ensaios de piezocone (CPTu) realizados em distintos pontos da barragem.

PALAVRAS-CHAVE: rejeitos de mineração, barragens alteadas à montante, ensaios de campo, descaracterização, descomissionamento.

ABSTRACT: The enormous amount of stored material, associated with the tailings' intrinsic and spatial (within the reservoir) variabilities, account for the complexities related to the stages of conception, operation, and shutdown of the tailings dams. Those aspects hinder the obtainment of representative parameters of the deposited mine tailings, preventing the comprehension of their behavior. Such inconveniences are particularly escalated in upstream heightened dams: the raising dikes are supported above the deposited tailings, which can be loose and saturated. In this regard, novel legislation has been introduced to increase the safety of the Brazilian mining industry by prohibiting the construction of new upstream dams and demanding the closure of the existing ones. Nevertheless, the shutdown of such structures is challenging because, in addition to the absence of proper normative recommendations, the records of the original projects (and the following modifications) are usually poor. Moreover, such structures may not be conceived to deal with the efforts deriving from material removal during the closure operations. As a reason, the *in situ* characterization of the mine tailings is of utmost importance in the tailings dam closure. Accordingly, the present work assesses the variability of the tailings within a dam that is about to be de-characterized through seven piezocone (CPTu) tests conducted in different locations within the dam.

KEYWORDS: mine tailings, upstream heightened dams, *in situ* testing, de-characterization, decommissioning.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o Brasil tem se destacado como um dos maiores fornecedores globais de minério de ferro, o que implica geração de quantidades consideráveis de rejeitos derivados dos processos de beneficiamento (Global Data 2022). Por questões práticas e econômicas, esses eram usualmente dispostos em barragens com alteamento a montante; isto é, nas quais os diques de alteamento são assentados sobre os rejeitos previamente depositados (Silva et al. 2024). No entanto, esses podem ser suscetíveis à liquefação por encontrarem-se saturados e em estado fofo, o que, atrelado à uma compreensão errônea do seu comportamento, compromete a segurança dessas estruturas de contenção e pode levar a eventos catastróficos (Santamarina et al. 2019; Armstrong et al. 2019). Nesse contexto, uma nova regulamentação foi recentemente introduzida no Brasil, proibindo a construção de novas barragens a montante e demandando o fechamento das já existentes (Schaper et al. 2020). Ou seja, hoje é fundamental lidar com as questões práticas relacionadas à desativação desses reservatórios, questões essas associadas aos processos de intervenção que visam eliminar completamente as características de barragem dessas estruturas, reincorporando-as ao meio ambiente de forma segura: a descaracterização da barragem.

Contudo, a descaracterização é uma atividade intrincada dada às solicitações oriundas dos procedimentos de movimentação e remoção de material da barragem, geralmente não previstas no projeto original, e da complexidade do rejeito em si. Diferentemente dos solos naturais, rejeitos de mineração são essencialmente materiais clásticos e antrópicos (Consoli et al. 2023). Ou seja, são compostos por fragmentos de rocha britada cujas características das partículas (gradação, forma e rugosidade) são afetadas pelos processos utilizados no beneficiamento, sendo suscetíveis, portanto, a eventuais alterações na rocha matriz e nesses processos de beneficiamento (Carmignano et al. 2021). O comportamento mecânico dos rejeitos é, assim, influenciado por todas essas particularidades, o que é um agravante no processo de descaracterização, já que modelos constitutivos utilizados em materiais convencionais podem não ser aplicáveis aos rejeitos de mineração. Ademais, a heterogeneidade nas características do rejeito ao longo do reservatório é outro fator-chave na descaracterização, pois o material depositado se distribui, e sedimenta, de modo não uniforme a partir do ponto de deposição, podendo dar origem a zonas formadas por materiais com diferentes gradações (Li et al. 2019).

Assim, o êxito de um processo de descaracterização recai sobre a descrição adequada do rejeito depositado, a qual permita a definição das condições do material nas diferentes zonas do reservatório bem como a obtenção de parâmetros de comportamento representativos. No entanto, a coleta de amostras indeformadas (e representativas das condições do material) para condução de ensaios de laboratório é tarefa intrincada em função da gradação do material, a qual tende a variar de siltosa a arenosa, e da dificuldade de acesso a certas áreas da barragem (Raghuandan et al. 2012; Quinteros e Carraro 2023). Desse modo, ensaios de campo devem ser utilizados para contornar essas adversidades, sendo o ensaios de cone (CPT) ou piezocone (CPTu) recomendados nesse contexto (Robertson et al. 2017; Sousa and Gomes 2020).

Portanto, o presente trabalho avalia a variabilidade existente nos rejeitos de minério de ferro dispostos em uma barragem que será descaracterizada por meio de sete ensaios de piezocone (CPTu) realizados em distintos pontos do reservatório. Tal abordagem permite compreender a variabilidade espacial na condição dos rejeitos depositados, além de fornecer um indicativo sobre o comportamento mecânico do material avaliado.

2 BARRAGEM ANALISADA

A barragem analisada situa-se na região do Quadrilátero Ferrífero, no estado de Minas Gerais, e pertence a um complexo do qual fazem parte outras barragens de rejeito de minério de ferro. Os diques de alteamento desse reservatório foram alteados a montante. Logo, há a necessidade de descaracterização dessa estrutura, com conseqüente movimentação e extração dos rejeitos de minério de ferro ali depositados. A figura 1 apresenta os pontos correspondentes aos sete ensaios de piezocone (CPTu) realizados a fim de verificar a homogeneidade do material depositado bem como da caracterização geral desse em termos de comportamento.

Os ensaios CPTu seguiram as diretrizes da norma ASTM D5778 (ASTM 2020), sendo executados a uma taxa de 20 mm por segundo com um piezecone de 10 cm² de área de base. A profundidade de cravação máxima foi de cerca de 35 metros para a maioria dos ensaios realizados.



Figura 1. Pontos dos ensaios CPTu na barragem.

3 RESULTADOS

3.1 Resultados Gerais

A figura 2 apresenta os dados básicos oriundos dos ensaios CPTu executados; isto é, resistência de ponta corrigida (q_t), razão de atrito (R_f), e poropressão medida na base (u_2). O rejeito depositado parece apresentar relativa homogeneidade ao longo da profundidade, dada a estreita faixa de variação dos parâmetros de resistência medidos em cada um dos pontos de perfuração. Ademais, a despeito das distâncias consideráveis entre os locais de ensaio, os resultados obtidos são similares e indicam pouca variabilidade do material depositado ao longo da barragem. Exíguas exceções são os pontos de ensaio P5 e P7. O primeiro apresentou certo pico de resistência de ponta por volta dos 7,5 metros de profundidade; logo retornando à tendência dos demais ensaios. No segundo, registraram-se valores de q_c ligeiramente inferiores aos demais, especialmente até os 20 metros de profundidade. Também, não houve acréscimo de poro-pressão gerado pela cravação do cone, indicando o comportamento drenante do material. Logo, u_2 corresponde à poro-pressão estática e revelou que o nível da água estava localizado a cerca de 7 metros de profundidade para a maioria dos pontos de ensaio, com exceção de P7, no qual a água estava em torno de 2 metros abaixo da superfície.

As análises envolvendo a classificação dos geomateriais por tipo de comportamento requerem, em sua maioria, a utilização de resultados normalizados do CPTu. Nesse sentido, a figura 3 apresenta os dados normalizados relativos à resistência de ponta (Q_m), atrito lateral (F_r), e poro-pressão (B_q). A determinação dessas grandezas deu-se com base nas metodologias correntes (Reid et al. 2018; Eslami et al. 2020), sendo que para estimativa da tensão vertical (σ_{vo}) utilizou-se a correlação proposta por Robertson e Cabal (2010) no cálculo do peso específico aparente do solo. Os dados apresentados na figura 3 corroboram a relativa homogeneidade do rejeito ao longo dos pontos analisados.

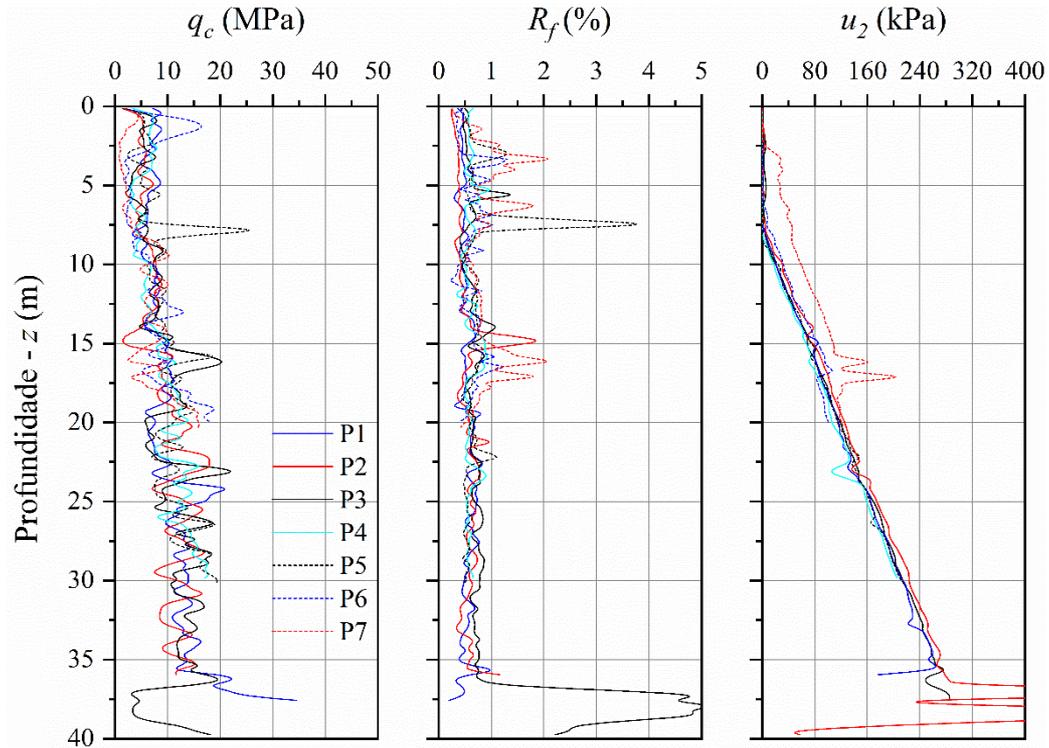


Figura 2. Resultados dos ensaios CPTu

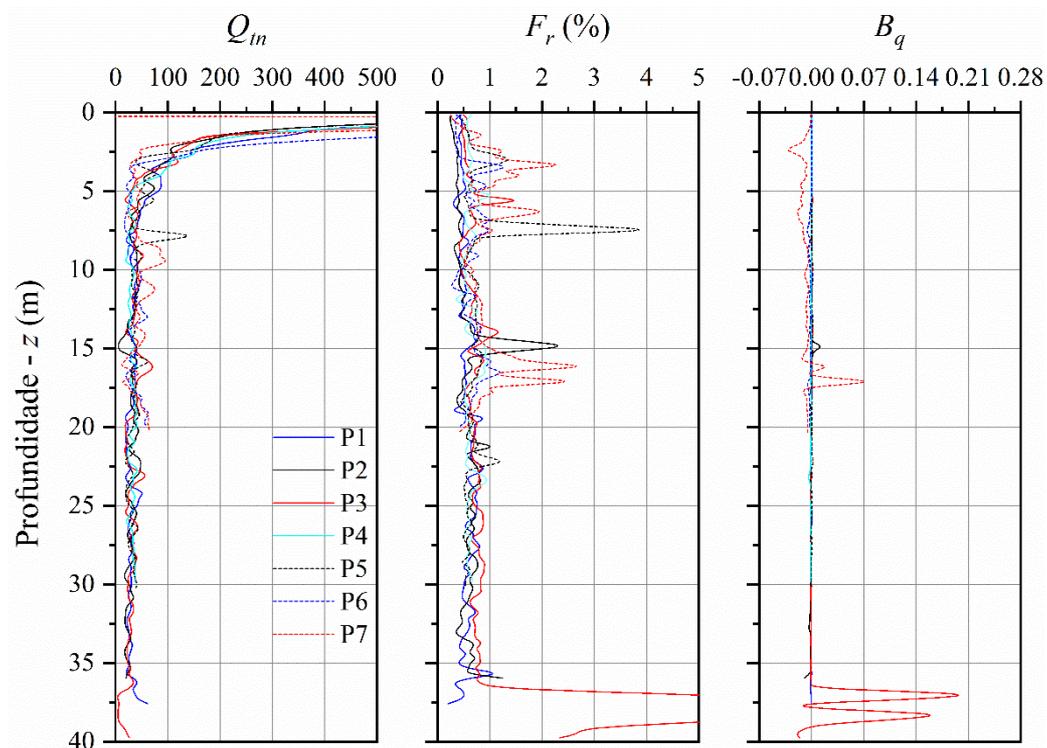


Figura 3. Resultados normalizados dos ensaios CPTu

3.2 Classificação do Comportamento do Material

Ao longo da profundidade investigada de cada ensaio, o rejeito foi classificado conforme o índice de classificação do material (I_c) proposto por Robertson e Wride (1998). Esse é função dos dados normalizados

de resistência de ponta (Q_m) e de atrito lateral (F_r) apresentados anteriormente. A figura 4 contém os valores de I_c ao longo da profundidade para cada um dos sete ensaios realizados. Em consonância com os resultados apresentados nas figuras 2 e 3, nota-se a homogeneidade do material depositado tanto verticalmente (no mesmo ensaio) quanto horizontalmente (entre ensaios). Basicamente, o rejeito de minério de ferro comporta-se como uma areia nos primeiros cinco metros de profundidade e como uma areia siltosa (ou silte arenoso) até o fim das profundidades máximas de cada um dos ensaios. Há exceções pontuais nos ensaios P2 e P5, os quais apresentam comportamento de silte argiloso (ou argila siltosa) em pequenos trechos entre 14 e 20 metros de profundidade.

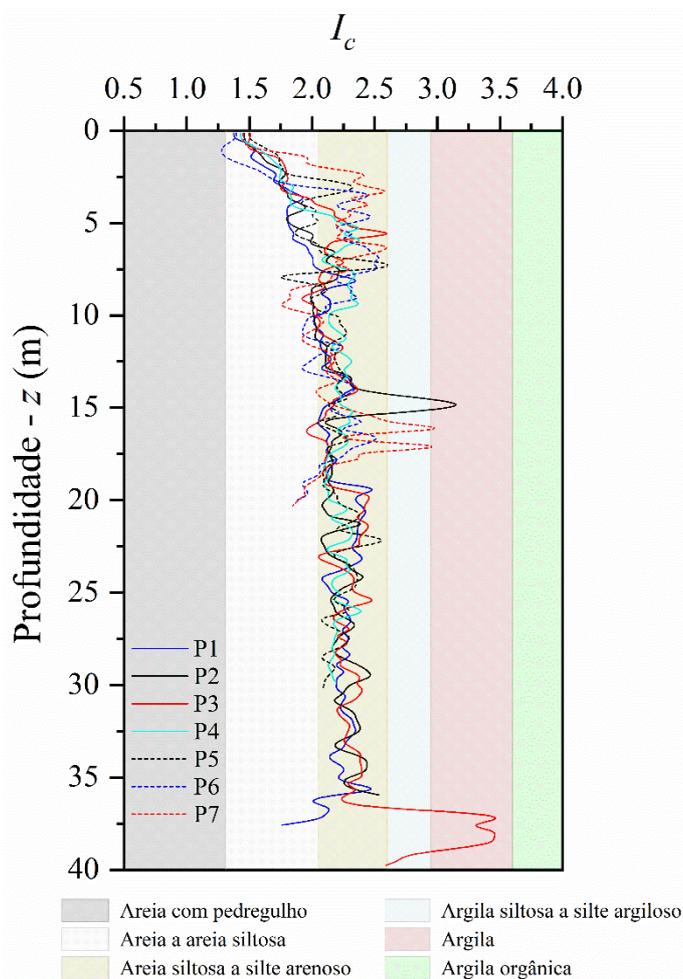


Figura 4. Índice de classificação do material

3.3 Análise do Estado do Rejeito Depositado

O comportamento dos rejeitos de minério de ferro pode ser analisado sob a ótica da Mecânica dos Solos dos Estados Críticos (MSEC), a qual tem como conceito basilar a ideia de que um material granular quando continuamente cisalhado passa a se comportar como um fluido friccional: a distorção prossegue em um regime com volume, tensão efetiva média, e tensão cisalhante constantes (Schofield e Wroth 1968). Logo, o estado crítico atua como uma condição de referência para a análise do comportamento de geomateriais, sendo base para diversos modelos constitutivos (Jefferies 1993; Gajo e Wood 1999; Wood 2008). No plano de compressão índice de vazios – tensão efetiva média ($e: \ln p$) o estado crítico pode ser idealizado matematicamente por uma função linear (ou variações), denominada de linha de estado crítico (LEC), e o estado atual do solo pode ser determinado com base nessa LEC por meio do parâmetro de estado (ψ). Comumente, ψ consiste na diferença entre o índice de vazios atual (ou antes do cisalhamento – e) e o índice de vazios no estado crítico (e_c), correspondente a mesma tensão efetiva; ou seja, é a medida da distância vertical entre e e e_c (Been e Jefferies 1985). Portanto, valores positivos para ψ indicam uma resposta contrativa (ou geração positiva de poro

pressão), enquanto valores negativos denotam um comportamento dilatante (ou geração negativa de poro pressão).

Assim, no contexto da descaracterização de barragens de rejeito, é fundamental estimar o valor de ψ a fim de prever (ou idealizar) o comportamento do material depositado. Valores de ψ superiores a -0.05 podem indicar tendência contrátil, o que pode significar zonas de instabilidade (ou liquefação) para o comportamento não drenado (Yoshimine e Ishihara 1998; Shuttle e Cuning 2007). Aqui, as abordagens propostas por Jefferies e Been (2015) e Robertson (2010) foram utilizadas para estimativa *in situ* do parâmetro de estado do material nos sete pontos de ensaio. De maneira geral, há uma concordância entre os resultados obtidos por essas duas metodologias. Ademais, o material analisado encontra-se majoritariamente na faixa de comportamento dilatante, sendo que apenas alguns pontos resultaram em valores de ψ superiores a -0.05. Porém, esses valores são de baixa magnitude, o que indica baixo potencial de compressão (ou de geração de poro pressão positiva para condições não drenadas).

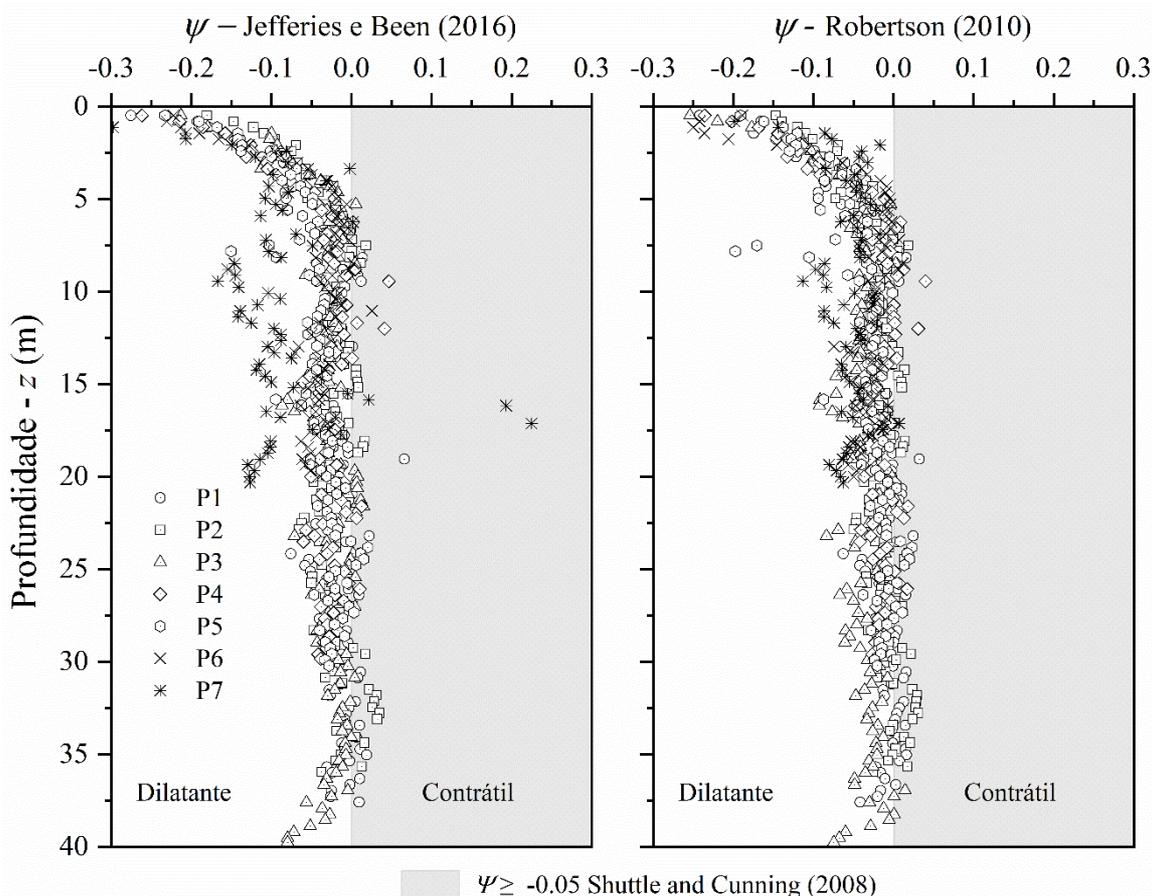


Figura 5. Tendência de variação volumétrica do rejeito.

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho consistiu na análise de sete ensaios CPTu realizados ao longo de uma barragem de rejeito de minério de ferro em iminente processo de descaracterização, com enfoque para a variabilidade vertical do material (no mesmo ensaio) e horizontal (entre ensaios). Dessa forma, com base nos resultados apresentados, e considerando as limitações do programa experimental, as seguintes conclusões podem ser feitas:

O nível de variabilidade entre os ensaios, e dentro do mesmo ensaio (ao longo da profundidade), é irrisório, indicando a homogeneidade vertical e horizontal do rejeito de minério de ferro depositado. Aspecto esse que é facilitador para concepção do plano de descaracterização.

O comportamento do rejeito depositado enquadra-se majoritariamente na faixa areia siltosa-silte arenoso, ou seja, é um material drenante sob condições usuais de carregamento. Ainda, nos primeiros cinco metros de profundidade o material é ainda mais grosseiro, enquadrando-se na faixa areia a areia siltosa.

Essencialmente o rejeito analisado apresenta valores negativos para o parâmetro de estado estimado, indicando comportamento dilatante. Ou seja, o risco de eventuais fenômenos de instabilidade relacionados à liquefação é reduzido.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam seus agradecimentos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e à Vale S.A.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Armstrong M, Petter R, Petter C (2019) Why have so many tailings dams failed in recent years? Resour Policy 63:101412. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101412>
- ASTM (2020) Standard Test Method for Electronic Friction Cone and Piezocone Penetration Testing of Soils - ASTM D5778. ASTM International
- Been K, Jefferies MG (1985) A state parameter for sands. Géotechnique 35:99–112. <https://doi.org/10.1680/geot.1985.35.2.99>
- Carmignano O, Vieira S, Teixeira AP, et al (2021) Iron Ore Tailings: Characterization and Applications. J Braz Chem Soc. <https://doi.org/10.21577/0103-5053.20210100>
- Consoli NC, Azambuja Carvalho JVD, Wagner AC, et al (2023) Determination of critical state line (CSL) for silty-sandy iron ore tailings subjected to low-high confining pressures. J Rock Mech Geotech Eng S1674775523002172. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2023.06.014>
- Eslami A, Moshfeghi S, MolaAbasi H, Eslami MM (2020) Soil behavior classification (SBC) using CPT and CPTu records. In: Piezocone and Cone Penetration Test (CPTu and CPT) Applications in Foundation Engineering. Elsevier, pp 111–144
- Gajo A, Wood M (1999) Severn–Trent sand: a kinematic-hardening constitutive model: the $q-p$ formulation. Géotechnique 49:595–614. <https://doi.org/10.1680/geot.1999.49.5.595>
- Global Data (2022) Brazil Iron Ore Mining Market by Reserves and Production, Assets and Projects, Fiscal Regime including Taxes and Royalties, Key Players and Forecast, 2021–2026
- Jefferies M, Been K (2015) Soil Liquefaction: A Critical State Approach, Second Edition, 0 edn. CRC Press
- Jefferies MG (1993) Nor-Sand: a simple critical state model for sand. Géotechnique 43:91–103. <https://doi.org/10.1680/geot.1993.43.1.91>
- Li Q, Liu Y, Zhang H (2019) Experimental study on sedimentation characteristics of fine tailings. IOP Conf Ser Mater Sci Eng 592:012186. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/592/1/012186>
- Quinteros VS, Carraro JAH (2023) The initial fabric of undisturbed and reconstituted fluvial sand. Géotechnique 73:1–15. <https://doi.org/10.1680/jgeot.20.P.121>
- Raghuandan M, Juneja A, Hsiung B (2012) Preparation of reconstituted sand samples in the laboratory. Int J Geotech Eng 6:125–131. <https://doi.org/10.3328/IJGE.2012.06.01.125-131>

- Reid D, Fanni R, Koh K, Orea I (2018) Characterisation of a subaqueously deposited silt iron ore tailings. *Géotechnique Lett* 8:278–283. <https://doi.org/10.1680/jgele.18.00105>
- Robertson PK (2010) Estimating in-situ state parameter and friction angle in sandy soils from CPT. Huntington Beach, California, USA, pp 471–478
- Robertson PK, Cabal KL (2010) Estimating soil unit weight from CP. CPT 10, CA, USA
- Robertson PK, Da Fonseca AV, Ulrich B, Coffin J (2017) Characterization of unsaturated mine waste: a case history. *Can Geotech J* 54:1752–1761. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0129>
- Robertson PK, Wride C (Fear) (1998) Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Can Geotech J* 35:442–459. <https://doi.org/10.1139/t98-017>
- Santamarina JC, Torres-Cruz LA, Bachus RC (2019) Why coal ash and tailings dam disasters occur. *Science* 364:526–528. <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. Gecamin Digital Publications, virtual format
- Schofield A, Wroth CP (1968) Critical state soil mechanics. McGraw Hill, New York
- Shuttle DA, Cunning J (2007) Liquefaction potential of silts from CPTu. *Can Geotech J* 44:1–19. <https://doi.org/10.1139/t06-086>
- Silva JPS, Rissoli ALC, Cacciari PP, et al (2024) Triaxial testing response of compacted iron ore tailings considering a broad spectrum of confining pressures. *Soils Found* 64:101438. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2024.101438>
- Sousa GM, Gomes RC (2020) Obtaining geotechnical parameters from correlations between geophysics and CPT tests in tailings dams. *REM - Int Eng J* 73:453–462. <https://doi.org/10.1590/0370-44672019730114>
- Wood DM (2008) Critical state and soil modelling. In: Proceedings of the Fourth International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, Millpress, Atlanta, p 1000
- Yoshimine M, Ishihara K (1998) Flow Potential of Sand During Liquefaction. *Soils Found* 38:189–198. https://doi.org/10.3208/sandf.38.3_189