

Estudo de propriedades físicas e geomecânicas de um rejeito de mineração de ferro em estado fofo

Julia da Silva

Bolsista de iniciação científica no curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil, julia.silva216100@gmail.com

Barbara Jade Alves

Bolsista de iniciação científica no curso de Engenharia Civil de Infraestrutura, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil, barbarajadealves@gmail.com

Helena Paula Nierwinski

Professor adjunto, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil, helena.paula@ufsc.br

Marcelo Heidemann

Professor adjunto, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, Brasil, marcelo.heidemann@ufsc.br

Amanda Silva Barbosa

Mestranda do curso de Engenharia Civil Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, amandabarbosa.3208@gmail.com

RESUMO: A extração de minérios no Brasil influencia diretamente no desenvolvimento do sistema econômico do país. Assim, em razão da ampliação das atividades mineradoras, destaca-se a importância de métodos construtivos seguros para o armazenamento de materiais derivados do processo de beneficiamento, como os rejeitos de mineração. Os rejeitos de mineração possuem propriedades físicas e geomecânicas dependentes do tipo de minério extraído e do processo de beneficiamento adotado, fatores estes que influenciarão também seu desempenho no interior de estruturas de armazenamento, como é o caso das barragens de rejeito de mineração. Diante deste fato, a presente pesquisa tem por objetivo caracterizar fisicamente um rejeito de mineração de ferro, avaliando valores de índices de vazios máximos e mínimos e seu estado em condição de compactação máxima à energia normal. Após, foram estudadas condições críticas que permitiram a confecção de corpos de prova para simulação de condições próximas àquelas oriundas do lançamento hidráulico de rejeitos no interior de uma barragem. Estes corpos de prova foram submetidos a ensaios triaxiais não-drenados. Os resultados dos ensaios demonstraram que o rejeito de mineração de ferro apresenta-se como um material de granulometria silto-arenosa, não plástico e com peso específico aparente seco pouco dependente do teor de umidade. Os ensaios triaxiais demonstraram que a condição ensaiada caracterizou uma estrutura frágil e com suscetibilidade à ocorrência de liquefação para os estados de tensões avaliados.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeitos, Mineração, Barragens, Ensaio Triaxial.

ABSTRACT: The extraction of ores in Brazil directly influences the country's economic system development. Thus, due to the amplification of mining activities, the importance of safe construction methods for storing materials derived from the beneficiation process, such as mining waste, stands out. Mining waste has physical and geomechanical properties dependent on the type of ore extracted and the beneficiation process adopted, factors that will also influence its performance within storage structures, such as mining waste dams. Given this fact, this research aims to physically characterize an iron mining waste, evaluating maximum and minimum voids indices values and its state under maximum compaction condition at normal energy. Afterward, critical conditions were studied that allowed the production of test specimens to simulate conditions close to those arising from the disposal of waste inside a dam. These specimens were subjected to undrained triaxial tests. The test results showed that the iron mining waste presents itself as a silty-sandy grain size material, non-plastic, and with a dry specific weight slightly dependent on the moisture content. The triaxial

tests showed that the tested condition characterized a fragile structure and susceptibility to liquefaction occurrence for the evaluated stress states.

KEYWORDS: Tailings, Mining, Dams, Triaxial Test.

1 INTRODUÇÃO

A mineração de ferro é uma atividade de grande importância econômica, especialmente no Brasil. No entanto, essa atividade resulta na produção de um subproduto conhecido como rejeito de mineração de ferro, material composto por partículas finas, sem valor comercial (IBRAM, 2016). As características físicas e geomecânicas dos resíduos de mineração são determinadas pelo tipo de minério que foi extraído e pelo método de beneficiamento utilizado (Vick, 1983). Esses fatores também afetam o comportamento desses resíduos quando armazenados em estruturas específicas, como as barragens de rejeitos de mineração. Por conseguinte, as barragens de rejeitos são estruturas geotécnicas projetadas para manter a estabilidade por um período muito extenso, frequentemente ultrapassando a vida operacional da própria mina (Araujo, 2006).

Barragens de contenção de rejeitos podem ser construídas utilizando o próprio rejeito ou materiais oriundos das atividades de mineração (como estéréis) e solos naturais de áreas de empréstimo. Por razões econômicas, as barragens são construídas por camadas não compactadas de rejeito granular depositado hidráulicamente, conhecidas como aterros hidráulicos (Vick, 1983). No entanto, o lançamento hídrico implica na formação de depósitos com um componente geotécnico complexo, exigindo o conhecimento das características físicas do rejeito, particularmente a resistência ao cisalhamento, o adensamento e a permeabilidade. Além disso, o processo de segregação natural das partículas do rejeito na praia de deposição pode se tornar um fenômeno bastante complexo devido às diferentes densidades dos minerais presentes. Esse processo de segregação hidráulica é bastante comum nos rejeitos de minério de ferro, devido à interação de diferentes granulometrias e densidades dos grãos de sílica e dos óxidos de ferro (Martin e McRoberts, 2002; Ribeiro, 2000).

De acordo com Morgenstern *et al.* (2016) e Robertson *et al.* (2019), episódios recentes de rupturas em barragens de rejeitos de mineração de ferro ocorridos no Brasil evidenciaram a necessidade de estudo e entendimento do comportamento dos rejeitos dentro destas estruturas. Além disso, análises das rupturas ocorridas e trabalhos científicos demonstraram que estes rejeitos, sob condições específicas, tem tendência a se liquefazer (Morgenstern *et al.*, 2016; Robertson *et al.*, 2019; Nierwinski, 2019). Assim, a gestão adequada desse rejeito é um desafio multifacetado que requer uma solução integrada e colaborativa, considerando aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais. Do ponto de vista técnico, a caracterização física e mecânica do rejeito é fundamental para entender suas propriedades e comportamento, especialmente quando submetido a condições de compactação, grau de saturação e nível de tensões específicas. Essas informações são cruciais para o projeto e a operação segura das estruturas de armazenamento. A gestão inadequada pode resultar em perdas financeiras para as empresas de mineração, além de impactos socioeconômicos e de preservação da saúde e vida das comunidades locais.

Neste contexto, o objetivo deste estudo é realizar caracterização física e mecânica de um rejeito de mineração de ferro, além de avaliar a suscetibilidade à ocorrência de liquefação do material no estado fofo (alto índice de vazios). Isso envolve a avaliação dos valores dos índices de vazios máximos e mínimos, bem como o estado do rejeito sob condições de compactação máxima à energia normal, além de analisar o comportamento do material quando submetido a ensaios triaxiais não drenados (CIU) em diferentes estados de tensões de confinamento. A escolha do ensaio triaxial do tipo CIU deve-se ao fato do mesmo permitir observar o comportamento do material em condições críticas de falta de drenagem e geração de excessos de poropressões provocados pela imposição de cargas. Esta análise é fundamental para entender melhor as propriedades físicas dos rejeitos de mineração de ferro e seu comportamento sob diferentes níveis de tensões.

2 METODOLOGIA

2.1 Rejeito de ferro e caracterização do material

O rejeito avaliado na presente pesquisa trata-se de um rejeito de mineração de ferro, proveniente de um depósito localizado na região nordeste do Brasil, cuja identidade não pode ser apresentada por questões de sigilo. O rejeito apresenta coloração cinza escuro quando seco, conforme Figura 1. Sua composição química é formada predominantemente por SiO₂, com pequenas quantidades de óxido de ferro, hidróxido e caulinita. Em termos de mineralogia, o rejeito é composto principalmente de quartzo e pequenas quantidades de hematita e goethita. Na etapa inicial do estudo, foi realizada a caracterização do minério de ferro com base em ensaios que Ortigão (2007) define como simples ou índice. Esses ensaios são essenciais para estabelecer parâmetros e análises do solo, assim, efetuaram-se ensaios de limites de Atterberg (ABNT NBR 7180/2016 e ABNT NBR 6459/2017), densidade relativa dos grãos (DNER – ME 093/94), granulometria (peneiramento e sedimentação, conforme ABNT NBR 7181/2017 e compactação máxima utilizando energia normal (ABNT NBR 6457/2016). Além disso, analisaram-se os valores dos índices de vazios máximos e mínimos, conforme normativas ABNT NBR 16840/2020 e ABNT NBR16843/2020 para determinação do índice de vazios de solos não coesivos.



Figura 1. Rejeito de mineração de ferro in natura.

2.2 Procedimento de Moldagem de corpos de prova e execução do ensaio triaxial

Os ensaios de compressão triaxial, também conhecidos como triaxiais estáticos, são os mais completos para entender parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo, que dependem da história e do estado de tensões deste. Esses ensaios são realizados em uma câmara triaxial (Figura 2c), onde os corpos de prova são submetidos a tensões confinantes e carregamentos axiais para simular as condições de campo.

Os corpos de prova submetidos ao ensaio triaxial foram reconstituídos a partir de uma amostrada deformada, utilizando-se um molde bipartido de dimensões de Ø50x100mm. A moldagem dos corpos de prova ocorreu utilizando-se o método “*moist tamping*”. Buscou-se moldar corpos de prova em condições críticas, ou seja, a fim de atingir a densidade relativa mínima correspondente ao máximo índices de vazios. Adotando-se um teor de umidade de 10% para auxiliar na mistura e compactação do material, foi possível confeccionar corpos de prova íntegros com densidade relativa, $\gamma_d = 1,90\text{g/cm}^3$, equivalente a um índices de vazios: $e = 0,9$. Para uma melhor homogeneidade da mistura, os corpos de prova foram moldados uniformemente em 3 camadas sucessivas, sendo as mesmas compactadas individualmente de forma manual e cuidadosa, com controle da altura das mesmas. O corpo de prova obtido é apresentado na Figura 2a.

Para a realização do ensaio triaxial foi utilizado um Equipamento de Ensaio Triaxial Estático – MS150 da marca Owntec. De acordo com o Manual de Instruções MS 150 – Ensaio Triaxial Estático, o equipamento permite a realização de ensaios em condições drenadas e não drenadas, e a saturação dos corpos de prova pode ser realizada por vários métodos, com a checagem do parâmetro de saturação B. Os ensaios foram realizados juntamente ao Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Santa Catarina, campus Joinville-SC. O equipamento apresenta dimensões de 2100 mm x 750 mm x 2100 mm (LxPxH); Peso total de: 400kg (Prensa: 300kg e Bancada: 100kg); Célula de carga com capacidade de 1000 Kgf; Curso máximo: 100mm; Tensão: 220V – 50/60Hz; Corrente: 5 A e Potência: 1,1 kW; A velocidade de avanço pode atingir de 0,0005mm/min até 100mm/min; Neste ensaio, foi adotada a velocidade de carregamento foi de 0,05 mm/min.

Os corpos de prova foram submetidos ao ensaio Adensado Isotropicamente/não drenado (CIU), conforme as normas ASTM D4767-11 e ISO-17892-9-2018. Aplicaram-se tensões confinantes de 25, 50 e 100

Kpa e obtenção de parâmetro B mínimo de Skempton, de 0,95. As leituras do procedimento foram retiradas automaticamente pelo equipamento e analisadas posteriormente através de planilhas Excel, para o tratamento dos dados, conforme será discutido a seguir.

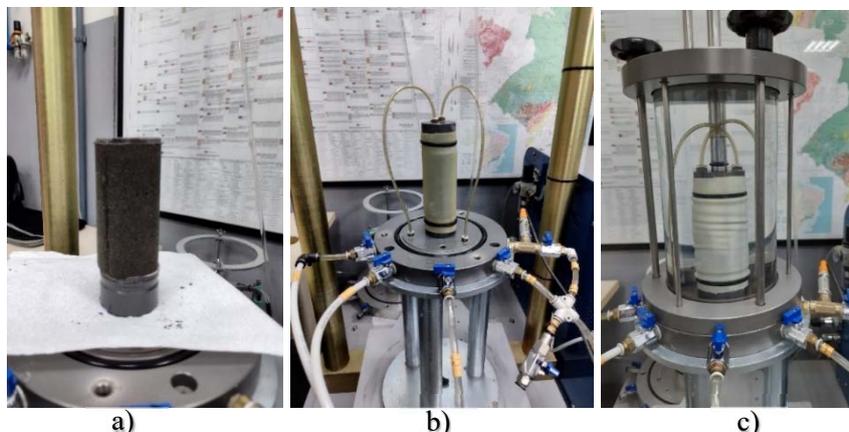


Figura 2. Ensaio Triaxial em: a) corpo de prova do rejeito de mineração de ferro após moldagem; (b) corpo de prova encamisado por membrana de látex; (c) câmara triaxial.

3 Discussões e Resultados

3.1 Propriedades físicas do rejeito de mineração de ferro

As propriedades físicas do rejeito de mineração de ferro foram descritas na Tabela 1. Nota-se que o material em estudo apresenta alta concentração de partículas finas em sua composição, comportamento não plástico, e classifica-se como A4 (solos siltosos) pelo sistema rodoviário (*Highway Research Board* – HRB) e ML (solo siltooso de baixa plasticidade) pelo sistema unificado de classificação (SUCS). Além disso, quanto à obtenção dos valores de índices vazios máximos e mínimos, embora a norma utilizada para a determinação destes limite a realização do ensaio para solos que apresentam no máximo 12% de material passante na peneira de 0,075mm, a aplicação dela foi efetuada nesse estudo, pois o rejeito de mineração de ferro não é um solo natural, apresentando caráter granular, embora composto por partículas cujo diâmetro se enquadra no grupo de silte e argilas.

Tabela 1. Propriedades físicas do rejeito de mineração de ferro.

Propriedade	Valor	Unidade
Limite de Liquidez (LL)	-	%
Limite de Plasticidade (LP)	-	%
Índice de Plasticidade (IP)	Não-Plástico (NP)	%
Densidade dos Grãos	3,64	G
Areia Fina (0.06 mm < Diâmetro < 0.2 mm)	69,00	%
Silte (0.002 mm < Diâmetro < 0.06 mm)	17,69	%
Argila (Diâmetro < 0.002 mm)	0	%
Diâmetro médio das partículas, D50 (mm)	0,069	mm
Peso específico seco máximo por compactação Proctor Normal	2,04	kN/m ³
Umidade ótima por compactação Proctor Normal	12,6	%
Classificação SUCS	ML	-
Classificação HRB	A4	-
e(mín)*	0,76	-
e(máx)*	1,05	-
γ_n (mín.)*	1,78	g/cm ³
γ_n (máx.)*	2,06	g/cm ³

*Resultados obtidos conforme normativa ABNT NBR 16840/2020 e ABNT NBR16843/2020

A partir da análise dos resultados apresentados pela Tabela 1, verifica-se que o rejeito apresenta um alto valor da densidade dos grãos, provocada pela presença do minério de ferro no material. A predominância do tamanho de partículas corresponde à uma areia fina. Os valores dos índices de vazios máximos e mínimos não variaram muito entre si. Destaca-se que a moldagem do corpo de prova para o ensaio triaxial buscou reproduzir a condição mais próxima possível da condição de índice de vazios máximo, de forma a obter um corpo de prova estável. Ademais, a Tabela 1 apresenta os resultados obtidos a partir do ensaio de compactação Proctor, na energia normal. Foi identificado um teor de umidade ótimo do material, $w_{otm} =$ igual a 12,6%, correspondente ao índice de vazios (e) igual a 0,79 e peso específico aparente seco igual a 2,04 g/cm³. Entretanto, verificou-se que o material apresentou pouca variação do peso específico aparente seco frente à adição de água, como se observa na Figura 3, sendo os valores dos pesos específicos pouco alterados dentro da faixa de umidade avaliada. Importante destacar, que apesar da pouca variação de comportamento do material com o teor de umidade, na condição ótima identificada, o índice de vazios ainda é inferior ao índice de vazios mínimo obtido para este material.

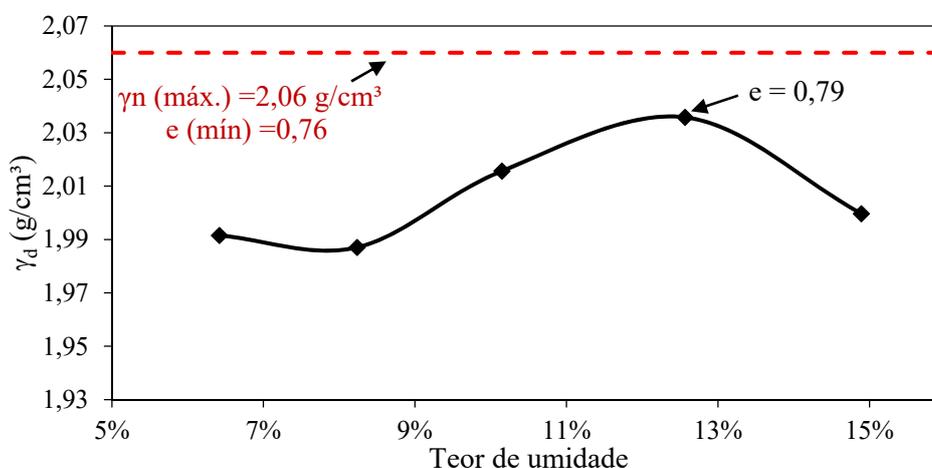


Figura 3. Curva de Compactação resultante do ensaio Proctor, sob energia normal.

3.2 Avaliação de propriedades de resistência do rejeito de mineração de ferro em condição fofa

A partir dos ensaios triaxiais não drenados, foi possível observar o comportamento do material graficamente relacionando a máxima tensão cisalhante mobilizada e a deformação axial atingida (q versus ϵ), conforme Figura 4a. Ademais, foram obtidas as trajetórias de tensões efetivas para as distintas tensões confinantes testadas (Figura 4b), e com essas informações foi possível obter de maneira indireta o ângulo de atrito efetivo de pico de solo (Φ'), em um gráfico de q versus p' . O valor de Φ' é definido como o ângulo máximo em que a força exercida sobre o solo pode ser inclinada em relação à força normal à superfície de contato, sem provocar o deslizamento do solo ao longo do plano de ruptura (PINTO, 2006). A partir da metodologia Cambridge, traçou-se o gradiente de uma linha através dos picos destas trajetórias de tensões, chamada de razão de atrito de estado crítico (M_{tc}).

Em análise aos dados da Figura 4 verifica-se que o corpo de prova moldado na condição fofa ($e=0,90$), sob condições não drenadas de cisalhamento resultou em valores de tensão desvio máximos, para cada nível de tensão confinante avaliado, bastante baixos. Para a tensão confinante de 25 kPa, a tensão desvio máxima (q de Cambridge) registrada foi de 7,34 kPa, para tensão confinante 50 kPa de 14,49 kPa e para a tensão confinante de 100 kPa, foi de 31,55 kPa. Por se tratar de um material granular, o ajuste da reta para obtenção do ângulo de atrito passou pela origem, não resultando em valores para o intercepto coesivo. O ângulo de atrito efetivo de pico encontrado foi de 10,94°. Salienta-se que os valores de ângulo de atrito efetivo de pico encontrados para a condição de estudo são extremamente baixos quando comparados com outros estudos da literatura com rejeitos de mineração de ferro, onde são registrados valores da ordem de 30° (Robertson *et al.*, 2019). Tal situação pode ser explicada pelo fato dos ensaios resultarem em valores nulos de q ao final do

ensaio, o que caracterizaria uma perda da estrutura com a condição de saturação e carregamento impostas, indicando ocorrência de liquefação.

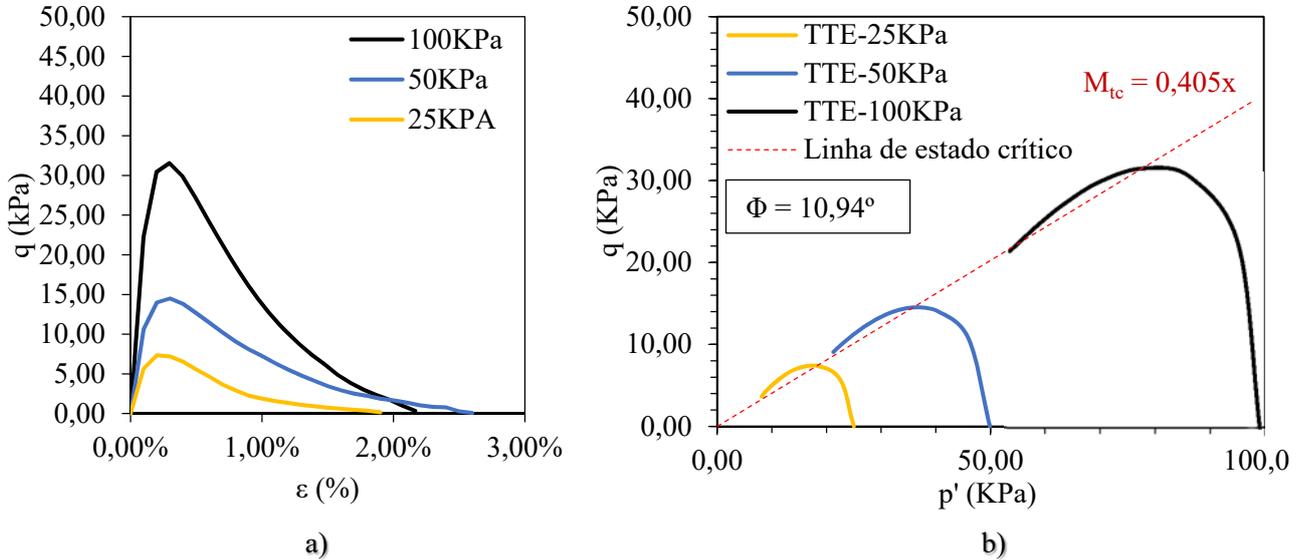


Figura 4. Trajetória de Tensões Efetivas no plano q e p' .

Na Figura 4b apresenta-se ainda, a envoltória que define a condição crítica obtida através dos ensaios. Utilizando-se os valores obtidos para o índice de vazios crítico e a tensão correspondente, provenientes dos resultados dos ensaios, foi possível representar graficamente no espaço de variáveis p' (pressão efetiva) versus e (índice de vazios) os conjuntos de dados (p' ; e). A configuração linear destes conjuntos indica a Linha de Estado Crítico (LEC) do material testado, conforme apresentado na Figura 5. Na Figura 5 também está representada a linha que define a condição inicial do material, previamente ao cisalhamento. Por se tratar de um ensaio realizado em condições não-drenadas, não há variação volumétrica e , portanto, o índice de vazios se mantém igual. No entanto, o nível de tensões (p') é reduzido até que a condição crítica é atingida. De acordo com Been e Jefferies (1985), a partir do cenário apresentado na Figura 5 é possível obter o parâmetro de estado do material (ψ), dado pela diferença entre o índice de vazios inicial e o índice de vazios na condição crítica, considerando o mesmo valor de p' . Com base nos resultados encontrados, verifica-se que o rejeito estudado apresentou comportamento contrátil e um valor de ψ positivo. Por exemplo, para um valor de p' de 50 kPa, tem-se um e de 0,9 para a condição inicial e 0,87 para o estado último, caracterizado um valor de ψ de +0,03.

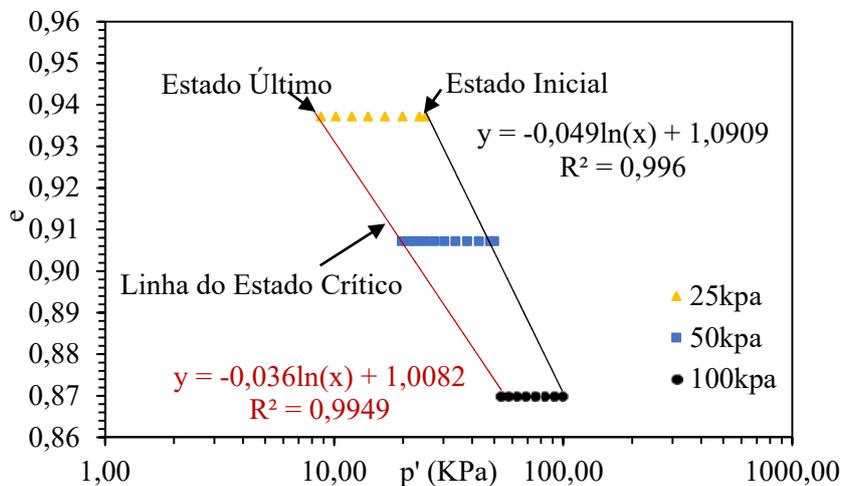


Figura 5. Representação Gráfica da LEC.

Robertson (2010) afirma que suscetibilidade à liquefação já começa a ocorrer em materiais cujo valor de ψ é igual a $-0,05$, assim é evidenciada a suscetibilidade à ocorrência de liquefação do rejeito estudado, para o qual se obteve ψ da ordem de $+0,03$. Segundo Neto (2006), a liquefação de solos arenosos está relacionada à redução da resistência do solo devido ao aumento da poropressão induzida por deformações resultantes de cargas aplicadas, seja de maneira monotônica ou cíclica. Os corpos de prova de rejeito submetidos ao ensaio triaxial apresentavam condição fofo, com alto índice de vazios, condição que levou à total perda de estrutura dos mesmos quanto submetidos aos carregamentos não drenados impostos. A Figura 6 representa a condição do corpo de prova ao final do ensaio, com a estrutura totalmente perdida, o que corrobora com a premissa de que houve liquefação do rejeito estudado.



Figura 6. Perda de estrutura do corpo de prova ao final do ensaio sob tensão confinante de 50KPa.

4 Considerações Finais

O presente trabalho apresentou a caracterização física e mecânica de um rejeito de mineração de ferro, descrevendo o material em estudo como um material de características silto-arenosas, não plástico e com peso específico aparente seco pouco dependente do teor de umidade.

Resultados dos ensaios triaxiais não drenados indicaram que o rejeito, nas condições ensaiadas (nível de tensões e índice de vazios - estado fofo), possui estrutura frágil, e sofre liquefação sob condições de carregamento não drenado. Identificou-se um comportamento contrátil do material através da avaliação de condições últimas de estado, embora o parâmetro de estado, apesar de positivo, não apresentando valor muito alto.

Destaca-se que o presente estudo baseou-se em resultados de ensaios triaxiais não-drenados, sendo que a posição da linha do estado crítico deva ser corroborada através de ensaios triaxiais drenados e com maior faixa de abrangência de níveis de tensão. Os resultados da presente pesquisa sugerem a necessidade de uma gestão cuidadosa dos rejeitos de mineração de ferro, especialmente quando em condições de saturação completa, em estado fofo e sob baixos níveis de tensões, a fim de evitar problemas de estabilidade, risco a vidas e impactos socioeconômicos e ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araujo, C.B. (2006). *Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação de Engenharia, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro 133 p.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2016). NBR 6457. *Amostras de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2017). NBR 6459. *Amostras de solos – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2020). NBR 16843. *Solo - Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos*, Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2020). NBR 16840. *Solo - Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos*, Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2016). NBR 7180 – *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.

Associação Brasileira De Normas Técnicas (2017). NBR 7181 – *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 093: Solos – determinação da densidade real. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, DNER, 1994.

IBRAM Instituto Brasileiro de Mineração Gestão e Manejo de Rejeitos de Mineração relatório disponível em: <http://www.ibram.org.br/sites/1300/1382/00006222.pdf>, 2016.

Morgenstern, N.R., Vick, S.G., Viotti, C.B, Watts, B.D. Fundão Tailings Dam Review Panel. Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam. August, 2016.

Neto, E.A.R. Utilização de um equipamento triaxial cíclico para estudo da liquefação de uma mistura de rejeitos de minério de granulometria fina. 2006. 105 p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

Nierwinski, H. P. (2019). *Caracterização e Comportamento Geomecânico de Rejeitos de Mineração*. Tese de doutorado em Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Ortigão, J. A. R. Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos. 3. ed. Terratek, 2007.

Marin, T.E. e Mcroberts E.C. Some considerations in the stability analysis of upstream tailings dams. Tailings and Mine Waste. 2002.

Pinto, Carlos. S. Curso Básico de Mecânica dos Solos. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

Ribeiro, L.F.M. *Simulação física do processo de formação dos aterros hidráulicos aplicado a barragens de rejeitos*. Tese de doutorado em Engenharia Brasília: Universidade de Brasília, 2000.

Robertson, P. K. Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test. J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 842:853, 2010.

Robertson, P. K.; Melo, L.; Willians, D. J.; Wilson, G. W. 2019. Report of the Expert Panel on the Technical Causes of the Failure of Feijão Dam I. December.

Skempton, A. W. *The Pore-Pressure Coefficients A and B*. Geotechnique, vol. 4, p. 143-147, 1954.

Vick, S.G. Planning, Design and Analysis of Tailings Dams. John Wiley & Sons, Inc., 369 p, 1983