

Avaliação Experimental do Comportamento Mecânico de Rejeito de Manganês Compactado

Guilherme do Carmo Vasconcelos

Mestrando em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil,
guilhermedocarmovasconcelos@gmail.com

Roberto Aguiar dos Santos

Professor, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, Brasil,
santosr@ufv.br

Matheus Navarra Satuf muniz

Engenheiro geotécnico senior, Vale, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, matheus.navarra@vale.com

Átila Geraldo Rochido dos Santos

Engenheiro Civil Geotécnico Master, Vale, Ouro Branco, Minas Gerais, Brasil, atilarochido@gmail.com

Michéle Dal Toé Casagrande

Professora, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil,
michele.casagrande@hotmail.com

RESUMO: Este trabalho apresenta a caracterização geotécnica de um rejeito de manganês proveniente de uma operação de beneficiamento mineral localizada na região norte do Brasil (estado do Pará). A caracterização foi realizada por meio de ensaios laboratoriais com o objetivo de avaliar os principais parâmetros físicos e mecânicos do material, visando subsidiar projetos de disposição e estabilidade de estruturas associadas. Os ensaios incluíram análise granulométrica, limites de Atterberg, densidade real dos grãos, compactação, permeabilidade e resistência ao cisalhamento por meio de ensaios triaxiais. Os resultados indicam que o rejeito apresenta predominância de frações finas, com comportamento silto-argiloso, baixa permeabilidade e plasticidade. Além disso, foi considerada coesão nula para o rejeito. A resistência ao cisalhamento mostrou influência tensão de confinamento. Tais características são relevantes para o entendimento do comportamento geotécnico do rejeito, especialmente no contexto de disposição em pilhas ou barragens. As informações obtidas contribuem para o avanço no conhecimento sobre o comportamento destes materiais e podem auxiliar no planejamento de medidas de reaproveitamento ou disposição segura.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeito de Manganês, Caracterização Geotécnica, Propriedades Físicas, Resistência ao Cisalhamento.

ABSTRACT: This study presents the geotechnical characterization of a manganese tailing resulting from a mineral processing operation located in the northern region of Brazil (Pará state). The characterization was carried out through laboratory tests aimed at evaluating the main physical and mechanical parameters of the material, in order to support disposal and stability projects of associated structures. The tests included grain size analysis, Atterberg limits, specific gravity, compaction, permeability, and shear strength through triaxial tests. The results indicate that the tailing is predominantly composed of fine fractions, exhibiting silt-clay behavior, low permeability, and low plasticity. Additionally, zero cohesion was considered for the tailing. The shear strength was influenced by the confining stress. These characteristics are relevant for understanding the geotechnical behavior of the tailing, especially in the context of disposal in piles or dams. The information obtained contributes to advancing knowledge about the behavior of such materials and may assist in planning reuse strategies or safe disposal measures.

KEYWORDS: Manganese Tailings, Geotechnical Characterization, Physical Properties, Shear Strength.

1 INTRODUÇÃO

O manganês é classificado como o décimo segundo elemento mais abundante na Terra e representa o quarto metal mais utilizado no mundo, ficando atrás apenas do ferro, cobre e alumínio. Na natureza, ocorre predominantemente na forma de óxidos, hidróxidos, silicatos e carbonatos, os quais constituem mais de uma centena de minerais contendo esse elemento. Contudo, apenas uma fração desses minerais é economicamente viável e classificada como mineral-minério (Dias & Caxisto, 2018; Lima & Neves, 2015).

O Brasil detém aproximadamente 10% das reservas mundiais de manganês, posicionando-se atrás apenas da Ucrânia (24%), África do Sul (22%) e Austrália (16%). A principal produção nacional está concentrada na Mina do Azul, operada pela Vale, localizada em Carajás (Parauapebas/PA). Em seguida, destacam-se a Urucum Mineração, em Corumbá (MS), e a Mineração Buritirama, em Marabá (PA). A BMC, situada em Espigão D'Oeste (RO), ocupa atualmente a quarta posição entre os principais produtores do país (Afonso, 2019).

O minério de manganês possui papel estratégico, sobretudo na produção de ligas metálicas. Seu uso é indispensável na fabricação de aço, além de compor ligas de cobre, zinco, alumínio, estanho e chumbo, contribuindo significativamente para diversas cadeias produtivas (Dias & Caxisto, 2018).

O processo de beneficiamento do minério de manganês, de forma geral, compreende etapas como moagem, peneiramento e classificação. Nesse processo, gera-se um volume considerável de rejeitos, compostos majoritariamente por partículas finas que não atendem aos critérios granulométricos exigidos para uso direto na produção de ferro-ligas. Assim, esses materiais são destinados, em sua maioria, a bacias de sedimentação ou barragens de rejeitos (Jesus, 2020).

A geração de rejeitos é uma questão crítica na indústria mineral, especialmente quando associada aos riscos ambientais e geotécnicos decorrentes de sua disposição inadequada. Este desafio assume maior relevância na região Norte do Brasil, onde a mineração de manganês tem papel expressivo na economia local (Lima & Oliveira, 2018). A correta caracterização geotécnica desses rejeitos torna-se, portanto, essencial para garantir a estabilidade e a segurança das estruturas de contenção, como pilhas e barragens (Das, 2013).

Diante desse cenário, o presente trabalho tem como objetivo avaliar experimentalmente o comportamento físico e mecânico de um rejeito de manganês, visando fornecer parâmetros geotécnicos que subsidiem projetos de engenharia voltados tanto para a disposição segura quanto para o reaproveitamento do material. Para isso, foram realizados ensaios laboratoriais que abrangem desde a caracterização física até a análise da resistência ao cisalhamento do rejeito em estado compactado.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais Utilizados

O material estudado é um rejeito de manganês disposto de maneira convencional, sem espessamento e/ou filtragem, proveniente de uma operação de beneficiamento localizada no estado do Pará, Brasil. Este rejeito é composto majoritariamente por frações finas, resultantes dos processos de lavagem e concentração do minério.

As amostras foram coletadas diretamente do reservatório da estrutura, homogeneizadas no local, armazenadas em sacos plásticos vedados e transportadas ao laboratório para realização dos ensaios geotécnicos. As amostras foram secas ao ar e posteriormente homogeneizadas novamente antes dos ensaios.

2.2 Métodos

Foram realizados os seguintes ensaios laboratoriais, seguindo os procedimentos das normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) e recomendações internacionais:

- Análise Granulométrica: utilizando peneiramento e sedimentação, conforme ABNT NBR 7181 (2025), para determinação da distribuição granulométrica.
- Limites de Atterberg: limites de liquidez e plasticidade segundo ABNT NBR 6459 (2016) e NBR 7180 (2016), para avaliação da plasticidade do material.

- Densidade Real dos Grãos: determinada conforme ABNT NBR 6458 (2025) e 17212 (2025).
- Ensaio de Compactação: utilizando o método de energia intermediária (Proctor Normal) conforme ABNT NBR 7182 (2025), para obtenção da curva de compactação (umidade ótima e peso específico seco máximo).
- Permeabilidade e Resistência ao Cisalhamento: A avaliação do comportamento mecânico foi conduzida por meio de ensaios triaxiais dos tipos consolidado não drenado com medição das pressões neutras (CU), conforme os procedimentos descritos nas normas ASTM D4767-11 (Reapproved 2020). Adicionalmente, o coeficiente de permeabilidade foi estimado a partir da fase de consolidação dos corpos de prova, seguindo as diretrizes presentes nas respectivas normativas.
 - A partir da curva de compactação Proctor intermediária, foram preparadas amostras por compactação em moldes triaxiais de dimensões 10x5 centímetros, no aparelho de compactação em equipamento miniatura – Ensaios Mini-MCV, na umidade ótima, visando simular condições reais de disposição em campo. O equipamento utilizado neste estudo foi o triaxial estático de 3,2 MPa, que conta com uma prensa FT - 17002 de 50 kN e também três pressurizadores hidráulicos.
 - As tensões de confinamento adotadas para os ensaios foram 400, 800 e 1600 kPa, de forma a avaliar o comportamento do material sob diferentes níveis de confinamento. A instrumentação incluiu medição de deslocamentos axiais, poropressões (CU) e cálculo de parâmetros de resistência.

3 RESULTADOS

3.1 Caracterização Física

3.1.1 Umidade Higroscópica

Para os ensaios, foi considerada a umidade higroscópica de 2,0 %. Verificou-se em laboratório que essa umidade não variou mais que 0,1 ou 0,2% entre os sacos vedados de armazenamento do rejeito de manganês.

3.1.2 Granulometria

Por meio da Figura 1, seguir, estão relacionados as curvas granulométricas com e sem defloculante obtidas para o rejeito de manganês.

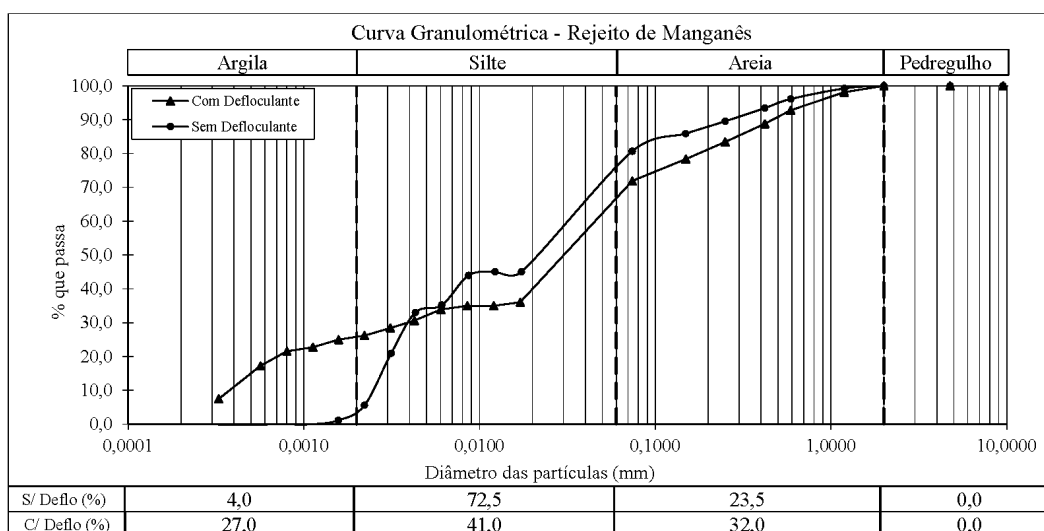


Figura 1. Curva granulométrica – Com e sem defloculante. (Fonte: Autores).

A análise granulométrica indicou que o rejeito possui predominância de frações finas, com cerca de

A densidade real dos grãos obtida foi de 3,02 g/cm³, valor relativamente elevado, coerente com a

composição mineralógica rica em óxidos e minerais de manganês.

3.2 Compactação

Para o ensaio de compactação, o material homogeneizado foi preparado em sacos plásticos com as devidas quantidades de água destilada, revolvido, vedado e reservado por 24h em câmara úmida, para favorecer a hidratação do material, uma vez que foi identificado a formação de pequenos grumos quando a água foi adicionada ao material.

A curva de compactação gerada através do ensaio de Proctor, na energia intermediária, indicou uma massa específica seca máxima de $1,58 \text{ g/cm}^3$ e uma umidade ótima de 28,2%, comportamento típico de materiais com predominância de finos e densidade dos grãos relativamente elevada. Foi utilizada uma linha de tendência para a ligação dos pontos pertencentes a curva, conforme está evidenciado na Figura 3 a seguir. Para efeito comparativo, a curva Proctor Normal do mesmo rejeito foi adicionada, porém essa curva fora obtida com a utilização de reuso do material na obtenção de cada ponto do processo de compactação.

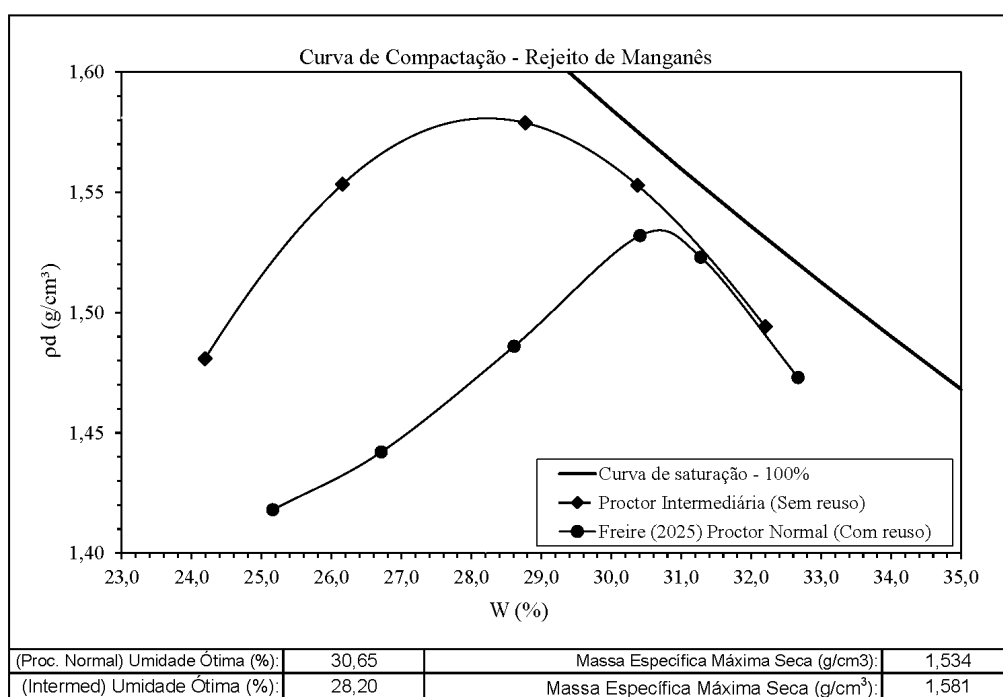


Figura 3. Curva de compactação – Energia Proctor Intermediária. (Fonte: Autores).

Percebe-se que, conforme esperado, com o aumento da energia de compactação, a curva com energia intermediária gerada está acima e a esquerda da curva de compactação normal, ou seja, obteve-se um material com uma maior massa específica seca máxima (ρ_d) para uma menor umidade ótima (w).

Por outro lado, compactando rejeitos de mineração com teor considerável de finos em umidades acima da ótima sob energia intermediária, como é o caso de utilização de vibração do rolo compactador, a massa seca pode ficar até menor do que a obtida com energia Proctor normal. Em rejeitos úmidos e ricos em finos, parte da energia intermediária é dissipada na fase água-ar do solo, em vez de atuar no esqueleto sólido.

É de extrema importância a necessidade da execução de aterros experimentais para respaldo ao projeto de disposição de rejeitos com características similares ao rejeito de manganês aqui explanado, uma vez que rejeitos silto-argilosos, de baixa permeabilidade, requerem tempo de secagem dilatado para atingir a condição aceitável de espalhamento e compactação. O critério do aterro experimental em campo deve abranger a faixa típica de variação das umidades de filtragem e constatar o afastamento destas em relação às variações de umidades indicadas aceitáveis para obter a compactação requerida no projeto.

3.3 Permeabilidade

Os ensaios de permeabilidade indicaram um valor para a permeabilidade (k) da ordem de $3,4 \times 10^{-8}$ m/s, classificando o rejeito como um material de baixa condutividade hidráulica. Esta característica é bastante relevante para controle de fluxos internos em estruturas como barragens e pilhas.

3.4 Resistência ao Cisalhamento

A Figura 4 a seguir, elenca os resultados gráficos envolvendo a deformação axial (ϵ_a) aos valores de tensão desviadora (σ_d), acréscimo de poropressão (Δu) e máxima obliquidade (σ_1'/σ_3') obtidos nos ensaios triaxiais supracitados.

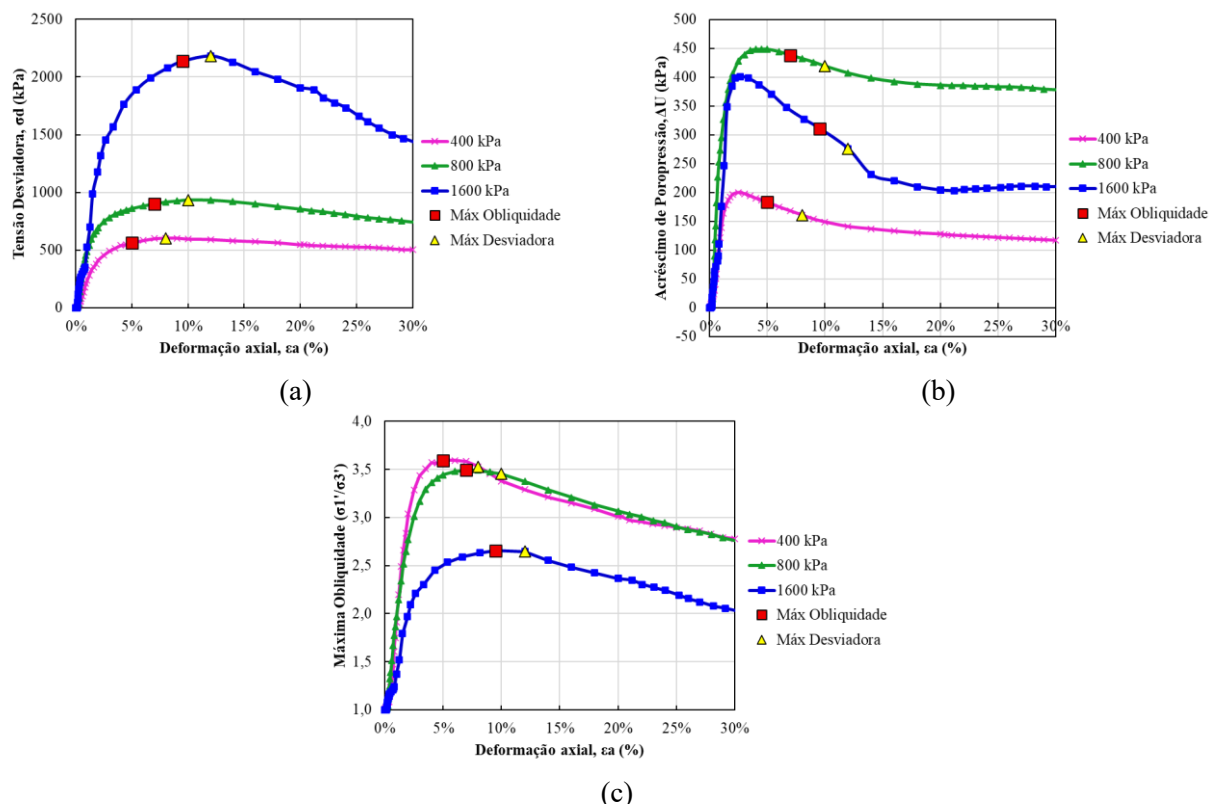


Figura 4. Resultados de Tensão Desviadora (σ_d) em (a), Acréscimo de Poropressão (Δu) em (b), Máxima Obliquidade (σ_1'/σ_3') em (c) por Deformação Axial (ϵ_a). (Fonte: Autores).

O gráfico de Tensão Desviadora (σ_d) pela Deformação Axial (ϵ_a) evidencia que tensão desviadora aumenta com a deformação axial até atingir um valor máximo, seguido por um platô ou leve queda, indicando ruptura dúctil. Maiores tensões confinantes (400, 800 e 1600 kPa) resultam em maiores resistências máximas.

Para uma tensão de confinamento maior, no caso 1600 kPa, a resistência atinge valores mais elevados (~ 2200 kPa), demonstrando que o material se torna mais resistente sob maior confinamento. A curva de Máx Desviadora segue a tendência dos dados experimentais, validando o critério de ruptura.

Para o gráfico de Acréscimo de Poropressão (Δu) pela Deformação Axial (ϵ_a), evidencia um Δu aumenta com a deformação, indicando que o rejeito gera poropressão durante o cisalhamento não drenado, conforme esperado para esse material. Sob 800 e 1600 kPa, Δu atinge valores mais altos (~ 400 a 450 kPa), o que pode reduzir a resistência efetiva do material.

Com relação ao gráfico de Máxima Obliquidade (σ_1'/σ_3') pela Deformação Axial (ϵ_a), a obliquidade aumenta com a deformação, mas tende a se estabilizar após $\sim 10\%$ de deformação axial, indicando ruptura progressiva. A Máxima Obliquidade e Máxima Desviadora apresentam comportamentos similares, com pequenas divergências em deformações maiores.

A Figura 5 a seguir, relaciona os valores de tensão desviadora (q) e tensão cisalhante média efetiva (p') utilizando a metodologia MIT.

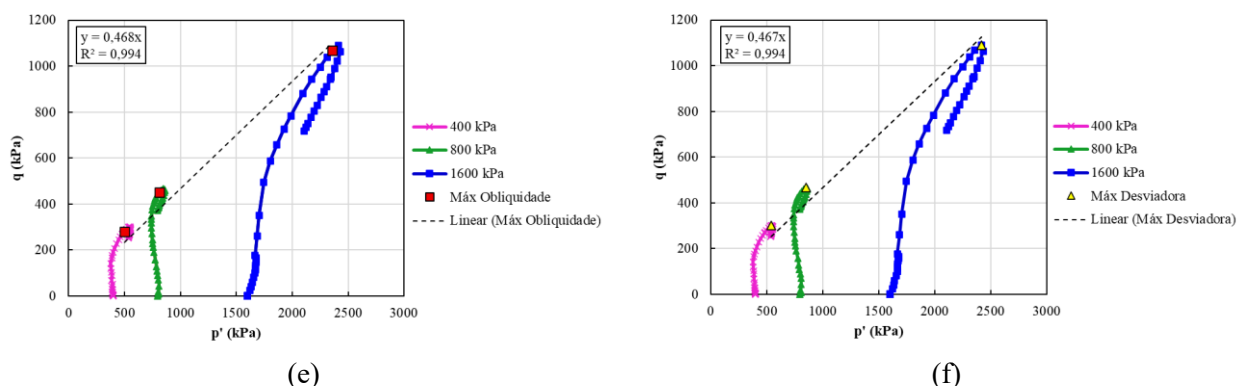


Figura 5. Parâmetros de resistência e envoltória de tensões efetivas com máxima obliquidade em (e) e máxima desviadora em (f) – Ensaio Triaxial CU. (Fonte: Autores).

Os resultados dos ensaios triaxiais CU (Consolidado Não Drenado) mostraram influência significativa da densidade e da umidade de compactação. Na condição compactada para a energia intermediária, na umidade ótima, os parâmetros médios Intercepto Coesivo efetivo (c') e Ângulo de Atrito Efetivo (ϕ') obtidos foram:

$$c' = 0,0 \text{ kPa e } \phi' = 28,0^\circ$$

3.5 Discussão dos Resultados

O comportamento mecânico do rejeito de manganês está condicionado à sua considerável densidade de grãos, baixa plasticidade e elevada proporção de silte. A baixa permeabilidade associada à resistência ao cisalhamento moderada aponta que o material possui características geotécnicas adequadas para disposição em barragens e pilhas, desde que sejam adotadas práticas que garantam o controle do grau de compactação e da umidade durante a construção.

Além disso, as propriedades observadas reforçam a necessidade de atenção aos mecanismos de fluxo interno, pois o acúmulo de água pode afetar significativamente o desempenho da estrutura, mesmo que a condutividade hidráulica seja baixa.

A perda significativa da resistência de pico no ensaio triaxial CU com confinante de 1600 kPa, sugere a existência de uma altura limite de empilhamento, em casos de utilização desse rejeito na construção de pilhas de disposição de rejeito.

Percebe-se que o rejeito de manganês ao ser solicitado em condições não-drenadas, as trajetórias de tensões efetivas não sugerem comportamento contrátil ou dilatante, apenas sugere uma variação modesta da tensão efetiva no carregamento não drenado, principalmente nas tensões mais baixas.

Sob carregamento rápido, a poropressão reduz a resistência efetiva, aumentando o risco de liquefação ou instabilidade e a disposição em barragens e pilhas de rejeitos requerem drenagem eficiente para mitigar o acúmulo de poropressão.

4 CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu avaliar experimentalmente as principais propriedades físicas e mecânicas de um rejeito de manganês proveniente da região norte do Brasil. As principais conclusões são:

- O material apresenta comportamento silto-arenoso a silto-areno-argiloso, com predominância de finos, baixa plasticidade e considerável densidade dos grãos.
- Apresenta baixa permeabilidade, o que é favorável ao controle de fluxos internos, mas exige atenção à drenagem superficial.
- A resistência ao cisalhamento é moderada, com coesão efetiva de 0,0 kPa e ângulo de atrito de aproximadamente $28,0^\circ$, dependente da umidade e do grau de compactação.

Os parâmetros obtidos são adequados para subsidiar projetos de disposição em pilhas e barragens de rejeitos, além de fornecer informações úteis para possíveis alternativas de reaproveitamento do material.

Ademais, em áreas de dimensão restrita para disposição, é importante que a taxa de alteamento seja compatível com a dissipação do excesso de poropressões em rejeitos compactados com umidade acima da faixa aceitável para obter o grau de compactação necessário.

O trabalho contribui para o avanço do conhecimento sobre rejeitos de manganês, tema ainda pouco explorado na literatura técnica brasileira, e ressalta a importância de estudos específicos para cada tipologia de material.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua gratidão pelo apoio financeiro (por meio de projetos de pesquisa e bolsas de mestrado, doutorado e produtividade em pesquisa) recebido do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e da Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAPDF) na realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 6459. *Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7180. *Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7181. *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 7182. *Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 6458. *Determinação da massa específica dos sólidos, da massa específica aparente e da absorção de água da fração retida na peneira com abertura de 2,0 mm*. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2025). NBR 17212. *Solo – Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2,0mm*. Rio de Janeiro.
- Afonso, J. C. (2019) *Manganês no Brasil: Descoberta, Extração, Consumo e Comercialização numa Perspectiva Histórica*. Revista Química Nova, São Paulo, Vol. 42, nº 10, 1172-1183.
- ASTM International (2020). ASTM D4767-11 (Reapproved 2020): *Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils*.
- ASTM International (2020). ASTM D7181-20. *Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils*.
- Das, B. M. (2013) *Princípios de Engenharia de Fundações*. 7. ed. São Paulo: Cengage Learning.
- Dias, T. G., Caxisto, F. (2008) *Recursos Minerais de Minas Gerais – Manganês*. Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais, CODEMGE, Minas Gerais, 18p.
- Lima, T. M., Neves, C. A. R. (2015) *Sumário Mineral Brasileiro 2015*, Departamento Nacional de Produção Mineral: Brasília, p. 80-82.
- Jesus, L. G. M. (2020) *Avaliação da pré-redução de briquetes de finos de minérios de manganês em ambientes análogos aos fornos elétricos a arco submerso*. Dissertação (Doutorado). Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Materiais e Metalúrgica, Escola de Engenharia, UFRGS, 147p.