

Comportamento Mecânico de Rejeito de Minério de Cobre

Saymon Porto Servi

Docente do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) e doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Rio Grande/RS, Brasil, saymon_servi@hotmail.com

Marcela Correa dos Santos

Discente da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande/RS, Brasil, marcelacorreasts@gmail.com

Karina Retzlaff Camargo

Docente da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande/RS, Brasil, karinacamargo@furg.br

Cezar Augusto Burkert Bastos

Docente da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande (FURG), Rio Grande/RS, Brasil, cezarbastos@furg.br

Nilo Cesar Consoli

Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre/RS, Brasil, consoli@ufrgs.br

RESUMO: No processo de beneficiamento de minérios de interesse, há geração de rejeitos oriundos dos processos físicos e químicos empregados. Tais materiais são caracterizados como misturas de rochas fragmentadas, agentes químicos e água. Entendendo-se que a compreensão do comportamento físico-químico é fundamental para uma correta disposição destes rejeitos, o presente estudo busca a caracterização geotécnica de um rejeito de minério de cobre e a avaliação de aspectos ligados a granulometria, propriedades de compactação, condutividade hidráulica e resistência ao cisalhamento. Os resultados obtidos mostraram ser este um material com tamanho de grãos análogo a um solo silto-arenoso com presença de partículas de argila, com valores elevados de peso específico real dos grãos (34 kN/m^3) e de peso específico aparente seco quando compactado (na faixa de $20,6$ à $22,4 \text{ kN/m}^3$), condutividade hidráulica compatível com a observada para solos de mesma granulometria ($3,2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$) e valores de ângulo de atrito de $35,8^\circ$ e intercepto coesivo nulo, obtidos sob cisalhamento direto.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeitos de mineração, materiais geotécnicos não convencionais, compactação, condutividade hidráulica, resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT: In the mineral processing of interest, there is generation of tailings from the physical and chemical processes employed. These materials are defined as a mixture of fragmented rocks, chemical agents and water. Understanding the physical-chemical behavior is crucial for proper disposal of these wastes. This study seeks to characterize the geotechnical properties of a copper mine tailings, evaluating aspects related to granulometry, compactness, hydraulic conductivity and shear strength. The results obtained show a material with grain size similar to a silty-sandy soil with the presence of clay particles, with high values of real specific weight of the grains (34 kN/m^3) and dry apparent specific weight when compacted (in the range of 20.6 to 22.4 kN/m^3), hydraulic conductivity in the order observed for soils of the same granulometry ($3.2 \times 10^{-7} \text{ m/s}$) and values of angle of friction of 35.8° and null cohesive intercept.

KEY WORDS: Mining, unconventional geotechnical materials, compaction, hydraulic conductivity, shear strength.

1 INTRODUÇÃO

A mineração é definida como uma atividade econômica e industrial de grande relevância na economia mundial e é constituída pela pesquisa, exploração, lavra e beneficiamento de minerais de interesse presentes na costra terrestre (Luz & Lins, 2018). O Brasil ganha destaque como um dos principais beneficiadores de minérios, registrando 83 tipos (e.g., ferro, ouro, alumínio, cobre) (Agência Nacional de Mineração – ANM, 2020).

Rejeitos de mineração, originários da cadeia de produção de minérios de interesse são constituídos por uma combinação de rochas fragmentadas, agentes químicos e água utilizada no processo de beneficiamento (Servi et al., 2022). As propriedades físico-químicas destes materiais podem variar em função do tipo de minério extraído, do método de beneficiamento e do tratamento químico recebido (Araújo, 2006). A heterogeneidade dos rejeitos implicam na dificuldade em prever o comportamento mecânico destes materiais, o que é realizado para materiais geotécnicos convencionais.

Tais rejeitos necessitam de cuidados quanto à sua disposição, devido à comum presença de elementos tóxicos e nocivos ao meio ambiente (Hua et al., 2017) e à estabilidade geotécnica das estruturas formadas. O Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM, 2016) destaca diversas técnicas para disposição destes materiais, sendo: (i) minas subterrâneas; (ii) cavas desativadas; (iii) empilhamento a seco; (iv) disposição em pasta (i.e., material sem fluidez natural e com baixa drenagem); e (v) barragens de contenção.

Carneiro & Fourie (2018) ponderam que a definição do tipo de método de disposição adotado tem dependência direta com a natureza do processo de mineração, das condições geológicas, topográficas e climáticas da região, das características mecânicas dos materiais e do impacto ambiental dos contaminantes dos resíduos. Os autores destacam ainda que para o melhor custo-benefício é necessário avaliar aspectos sociais, ambientais e econômicos envolvidos.

O método comumente utilizado na prática é dado pela disposição de rejeitos na consistência de polpa (i.e., teor de sólidos entre 10 e 25%) em barragens de contenção (IBRAM, 2016). Esta técnica é conhecida como método convencional.

Devido ao elevado volume de rejeitos gerados periodicamente, são necessários processos de elevação da capacidade do reservatório, estes conhecidos como processos de alteamento. Há diferentes metodologias de alteamento de barragens de contenção, sendo estas caracterizadas quanto ao tipo de assentamento do dique a ser construído.

A Figura 1 exibe os tipos de processos existentes no alteamento de barragens.

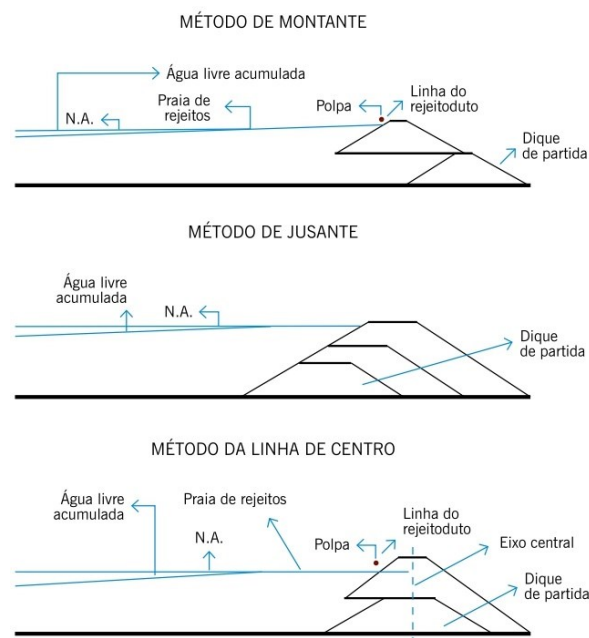


Figura 1. Técnicas de alteamento de barragens de contenção de rejeitos (Espósito, 2000).

Fernandez-Iglesias et al. (2013) destacam que, embora haja atrativos econômicos quanto ao uso de barragens de contenção, este método construtivo e as propriedades físico-químicas dos rejeitos alocados tornam estes reservatórios passíveis de danos ambientais, principalmente devido a baixa recuperação das áreas de disposição. Para desenvolvimento desta metodologia são necessários uma vasta investigação acerca do rejeito disposto e um rigoroso controle geotécnico das etapas executivas, garantindo a estabilidade da estrutura.

O *World Information Service on Energy Uranium Project* (WISE, 2021) constata que foram registrados mais de 250 incidentes envolvendo barragens de rejeitos entre os anos de 1917 e 2022. Dentre as rupturas observadas, comumente aponta-se como causa principal o fenômeno de liquefação.

O fenômeno de liquefação em materiais geotécnicos pode ser caracterizado por uma alteração da consistência da estrutura, passando do estado sólido para fluído. Isto ocorre em materiais expostos a carregamentos não drenados. Com o aumento da poropressão, há redução das tensões efetivas no maciço, tendenciando a resistência ao cisalhamento a um valor nulo (Carrera et al., 2011).

As rupturas de barragens têm forte influência do tipo de aspecto construtivo adotado. O *International Commission On Large Dams* (ICOLD, 2001) destaca que o método de alteamento a montante toma destaque no número de incidentes, sendo 65% dos casos entre os métodos supracitados.

No Brasil, as rupturas ocorridas nas minas de Mariana e do Córrego do Feijão, em 2015 e 2019, respectivamente, resultaram em um vasto impacto ambiental, social e econômico, com o despejo de cerca de 40 milhões de m³ de rejeitos e registro de cerca de 300 óbitos por decorrência (Morgenstern et al., 2016; Robertson et al., 2019). Devido a este cenário, foram proibidos os desenvolvimentos de novas barragens de contenção de rejeitos alteadas pelo método a montante (Consoli et al., 2022). Tal técnica propicia uma condição metaestável para os diques alteados, em virtude da base do alteamento ser assentada em parte sobre os rejeitos de mineração e em parte sobre o dique inferior.

Diversos autores (Consoli et al., 2022; Servi et al., 2022; Mafessoli et al., 2023) ilustram a possibilidade de disposição de rejeitos de mineração em pilhas filtradas, com ou sem adição agentes químicos. De maneira geral, uma lição tirada é de que se torna necessário compreender o comportamento geomecânico de rejeitos de mineração para uma disposição segura.

2 PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1 Material

O material em estudo é um rejeito de minério de cobre (RMC) originário da região do estado do Pará e cedido por uma empresa que atua na área de exploração e tratamento de minérios. A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Geotecnia e Concreto Prof. Dr. Claudio Renato Rodrigues Dias (LGC) da Universidade do Rio Grande (FURG) em uma parceria com o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS).

O rejeito de minério foi enviado da unidade geradora até o local de desenvolvimento do estudo em bombonas com capacidade total de 50 L, contendo o material em um alto teor de umidade. No laboratório, o rejeito foi colocado em estufa com temperatura de 60 °C por um período de tempo suficiente para verificar constância da massa.

O processo de secagem teve por objetivo deixar o material preparado para desenvolvimento dos ensaios laboratoriais e em condições mais controladas (*i.e.*, teor de umidade baixo ou próximo ao nulo). Ao final do procedimento, o material foi acondicionado em bombonas limpas e fechadas, de modo a evitar ganho de umidade e/ou contaminação por outros materiais. Previamente a cada análise, foram retiradas amostras para verificação da umidade higroscópica e não foram observadas alterações ao longo do tempo para os diversos ensaios desenvolvidos.

2.1.1 Métodos

Rejeitos de mineração podem ser classificados como materiais geotécnicos não convencionais, em virtude de serem gerados a partir da cadeia produtiva de obtenção de minérios de interesse, diferente de solos que têm origem pedológica. Com base nesta consideração, diversos autores na literatura (Festugato et al., 2015; Hu et al., 2017; Servi et al., 2022) analisam o comportamento físico destes materiais a partir da métodos comumente utilizados para solos convencionais.

Neste cenário, realizaram-se ensaios de caracterização (peso específico real dos grãos, análise granulométrica, limites de Atterberg), classificação geotécnica, ensaios para determinação dos índices de vazios máximo e mínimo e ensaios Proctor de compactação. Os resultados obtidos nos ensaios supradescritos foram utilizados como base para o planejamento dos ensaios de permeabilidade e de avaliação da resistência ao cisalhamento.

Primeiramente, foi avaliado o peso específico real dos grãos (massa de solo seco por volume dos grãos de solo), seguindo orientações da NBR 6458 (ABNT, 2016). O ensaio foi realizado utilizando um picnômetro com capacidade de 500 mL.

A composição granulométrica do material foi avaliada a partir de processos de peneiramento e sedimentação, com base na NBR 7181 (ABNT, 2016). As frações granulométricas (argila, silte, areia fina, areia média, areia grossa) foram pautadas com referência na NBR 6502 (ABNT, 1995).

Na verificação da distribuição granulométrica dos grãos inferiores a 75 µm, mediante o ensaio de sedimentação, a NBR 7181 (ABNT, 2016) indica o uso de hexametáfosfato de sódio como agente para dispersar a agregação de partículas finas de solo, garantindo fidelidade na relação entre a velocidade de sedimentação da parcela fina de material e o verdadeiro tamanho de grão das partículas.

Entretanto, Senft et al. (2011) destacam a possibilidade de efeito reverso mediante o uso do agente químico defloculante quando aplicado em rejeitos de mineração, podendo ocorrer o processo de floculação da parcela fina. Para avaliar tal possível efeito, foram realizados ensaios com e sem uso de agente dispersor.

Para os limites de Atterberg foram avaliados os limites de liquidez (LL) e de plasticidade (LP), tomando como referência as normativas NBR 6459 (ABNT, 2016) e a NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente. Os resultados objetivaram avaliar o índice de plasticidade (intervalo entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade) e o índice de atividade coloidal (razão entre índice de plasticidade e percentual de grãos menores que 2 µm).

A classificação geotécnica foi obtida com base no Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) (ASTM D2487, 2017) e no sistema da *Transportation Research Board* (TRB) (ASTM D3282, 2015).

Com enfoque em rejeitos de mineração, McLeod & Bjelkevik (2017) desenvolveram uma classificação comparativa entre tais materiais não convencionais e solos, tomando como referência unicamente a curva granulométrica como parâmetro de análise. Os autores descrevem cinco classes de materiais, sendo: (i) resíduos granulares (*coarse tailings* – CT), similares a solos areno-siltosos não plásticos; (ii) resíduos de rocha dura (*hard rock tailings* – HRT), análogos a siltes arenosos; (iii) resíduos de rochas alteradas (*altered rock tailings* – ART), correlatos a siltes arenosos com presença de partículas de argila; (iv) resíduos finos (*fine tailings* – FT), relacionados a argilas siltosas altamente plásticas e de condutividade hidráulica baixa; (v) resíduos ultrafinos (*ultra fine tailings* – UFT), equivalentes a argilas altamente plásticas com condutividade hidráulica muito baixa.

Em relação ao estudo de compacidade do rejeito de minério de cobre, foram avaliados o índice de vazios (razão entre os volumes de vazios e de sólidos) máximo e mínimo, com base na NBR 16840 (ABNT, 2020) e NBR 16843 (ABNT, 2020). O intuito da análise é verificar os índices físicos no material em distintos estados de compacidade.

Os ensaios Proctor de compactação foram realizados para determinar o peso específico aparente seco máximo ($\gamma_d \text{ máx}$) e a umidade ótima ($w_{ótima}$) do rejeito de minério de cobre em diferentes energias de compactação (normal, intermediária e modificada). Os procedimentos de ensaios são fundamentados na NBR 7182 (ABNT, 2016).

A permeabilidade pode ser avaliada a partir de métodos distintos, sendo a escolha destes pautadas na granulometria do material em estudo. Comumente, para solos granulares emprega-se o uso de permeâmetro submetido a carga hidráulica constante (ABNT NBR 13292, 2021), enquanto que para solos argilosos adota-se o uso de permeâmetro submetido a carregamento hidráulico variável (ABNT NBR 14545, 2021).

De modo a traçar um comparativo dentre os métodos e buscar avaliar o comportamento hidráulico do rejeito de cobre, utilizaram-se as duas técnicas (carga constante e carga variável). Este processo foi realizado em virtude de o material em estudo tender a não ter comportamento convencional quando comparado com solos. Os corpos de prova do rejeito de minério de cobre foram compactados de forma dinâmica, na energia Proctor normal, diretamente no permeâmetro.

A resistência ao cisalhamento do rejeito de minério de cobre foi avaliada a partir de ensaios de cisalhamento direto, sendo estes realizados a partir de procedimentos descritos na normativa ASTM D3080 (2004). Os corpos de prova em estudo têm formato cilíndrico com 60 mm de diâmetro e 20 mm de altura e foram obtidos a partir da compactação estática do material dentro do molde de ensaio. Os ensaios foram realizados em equipamento Wille Geotecnik com refitting da Owtec Soluções em Engenharia.

Na execução do ensaio aplica-se uma tensão vertical na amostra e impõe-se uma deformação cisalhante a velocidade constante, enquanto obtêm-se medidas de deslocamentos horizontal e vertical, através de régua resistivas e medida de reação a aplicação do esforço de cisalhamento com uso de uma célula de carga. Os valores medidos de força horizontal (F_x) e deslocamentos horizontal (d_x) e vertical (d_z) são dados pelo equipamento em quilonewton (kN) e milímetros (mm), respectivamente. A tensão cisalhante aplicada é definida a partir da razão entre força horizontal e área da amostra (A), conforme ilustra a Equação 1.

$$\tau = F_x / A \quad (1)$$

Foi adotado o critério de ruptura de Mohr-Coulomb, descrito na Equação 2. Nesta metodologia, os parâmetros de resistência empregados são ângulo de atrito de pico (ϕ_p) e intercepto coesivo (c'). Os parâmetros de resistência são dados em termos de tensões efetivas, visto ser garantida condição drenada nos ensaios de cisalhamento.

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2)$$

onde: τ é a resistência ao cisalhamento e σ' é a tensão normal em termos efetivos

A fim da obtenção dos parâmetros de resistência ao cisalhamento, foram ensaiados quatro espécimes em cisalhamento direto sob diferentes tensões verticais, sendo estas de 50, 150, 500 e 1000 kPa. Em cada um destes a inundação prévia por no mínimo 12 horas dos corpos de prova foi proporcionada. A condição drenada dos ensaios, sem geração de poropressão, é garantida com o uso de velocidades de cisalhamento baixas. Bolton (1986) indica que as taxas de carregamento devem ser de 1 mm/min para areias, 0,01 mm/min para siltes e 0,001 mm/min para argilas, tais imposições resultam em tempos de ensaios aproximados de 1 minuto, 17 horas e 7 dias, respectivamente, para uma deformação horizontal final de 10 mm.

Tomando como referência a curva granulométrica do material e a projeção de 8 horas de ensaio, empregou-se uma velocidade de ensaio de 0,025 mm/min.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A determinação do peso específico real dos grãos, realizado com uso do picnômetro, foi desenvolvida em três repetições. Como resultado foi obtido um valor médio de 34,0 kN/m³ e um desvio padrão amostral de 0,2 kN/m³. Observa-se um elevado peso específico real dos grãos, acima do intervalo faixa de 25 à 28 kN/m³ verificado para solos convencionais (Lambe & Whitman, 1969; Neves, 2016). Entretanto, tal valor é da ordem de grandeza comumente encontrada em rejeitos de mineração, na faixa de 28 a 36 kN/m³ (Servi, 2022). Diversos autores na literatura (Hu et al., 2017; Li & Coop, 2019) explicam essa elevada densidade dos grãos com altos teores remanescentes de óxidos oriundos da rocha de origem do material em estudo (e.g., óxidos de ferro, de cobre, de alumínio).

A Figura 2 ilustra as curvas granulométricas do rejeito de minério de cobre com (RMC-C) e sem (RMC-S) uso de agente químico dispersor. Os resultados obtidos corroboram com o pressuposto indicado na NBR 7181 (ABNT, 2016), em que o hexametáfosfato de sódio promove a dispersão das partículas finas, pois para a curva RMC-C há uma maior parcela de finos (frações granulométricas silte e argila) do que observado para a curva RMC-S. O presente material em estudo não constata o fenômeno inverso verificado por Senft et al. (2011).

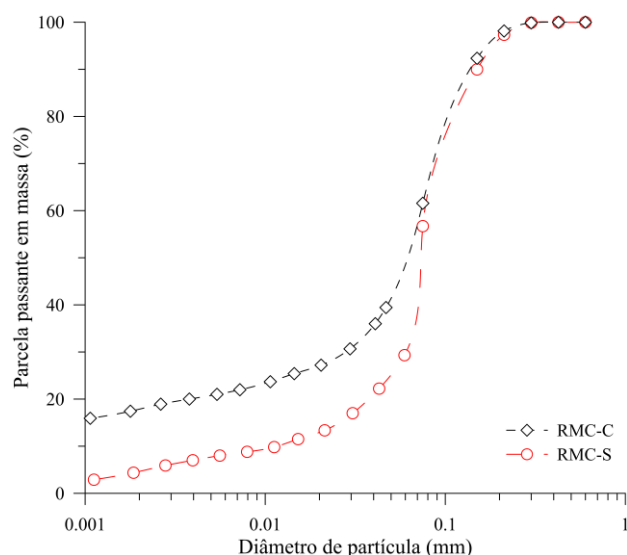


Figura 2. Curvas granulométricas de rejeito de minério de cobre com (RMC-C) e sem (RMC-S) agente químico dispersor.

A determinação das frações granulométricas será realizada apenas para a curva RMC-C, tendo em vista que a curva RMC-S não representa a correta distribuição de grãos do rejeito de mineração. A Tabela 1 traz as frações granulométricas, tomando como referência a escala adotada pela normativa NBR 6502 (ABNT, 1995).

Tabela 1. Frações granulométricas do rejeito de minério cobre com agente químico dispersor (RMC-C).

Fração granulométrica	Diâmetro (mm)	Porcentagem (%)
Areia grossa	$0,6 < \phi \leq 2$	0,0
Areia média	$0,2 < \phi \leq 0,6$	2,8
Areia fina	$0,06 < \phi \leq 0,2$	46,1
Silte	$0,002 < \phi \leq 0,06$	33,2
Argila	$\phi \leq 0,002$	17,9

Com base na escala adotada, o material tem frações granulométricas equivalentes a um solo areno-siltoso com presença de argila. Quanto à parcela total de finos (soma de silte e argila - grãos inferiores a 0,06 mm) tem-se 51,1%, enquanto o resto do material tem distribuição granulométrica na faixa de areias predominante finas.

Em relação aos limites de Atterberg, não foi possível realizar o limite de liquidez e o limite de plasticidade, seguindo os procedimentos descritos pela NBR 6459 (ABNT, 2016) e pela NBR 7180 (ABNT, 2016), sendo assim o rejeito de minério de cobre foi considerado um material não plástico. Logo, não foi possível avaliar os índices de plasticidade e de atividade coloidal.

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) (ASTM D2487, 2017), o rejeito de minério de cobre pode ser classificado como silte arenoso (ML). Segundo a normativa, o material é considerado um silte em virtude da presença de fração granulométrica majoritariamente inferior a 0,075 mm (61,6% dos grãos), enquanto o termo “arenoso” é acrescido devido à presença de fração arenosa superior a 30%.

Segundo a *Transportation Research Board* (TRB) (ASTM D3282, 2015), o rejeito de cobre é classificado no grupo A-4(5). Em comparação a solos, o material seria considerado um silte não plástico, coerente com os resultados obtidos na caracterização. O índice de grupo de 5 indica que o material tende a ter bom comportamento mecânico quando aplicado como uma camada de subleito.

Com base na metodologia de McLeod & Bjelkevick (2017), o rejeito de cobre é classificado como um rejeito de rocha dura (HRT). Na comparação com solos convencionais, os autores destacam que o material teria comportamento mecânico similar a um silte arenoso não plástico.

Ao aplicar o ensaio de índice de vazios máximo, constatou-se um valor médio de 1,12 e desvio padrão de 0,004. Tal resultado constata-se próximo ao verificado para areias mal graduadas com formato de grãos angulares, segundo Massad (2016). Com base no peso específico real dos grãos de 34,0 kN/m³, é possível correlacionar os valores de peso específico aparente seco mínimo e porosidade máxima, sendo da ordem de 16,0 kN/m³ e 52,8%, respectivamente.

O índice de vazios mínimo não foi possível de ser executado, pois durante o processo de vibro-compactação, o rejeito de cobre flui através da interface cilindro-peso. Tal efeito é consonante com o indicativo na NBR 16843 (ABNT, 2020) que aponta como valor limítrofe para a realização do ensaio uma porcentagem de partículas menores que 75 µm não inferiores à 12%, sendo que o material em estudo ilustra quantidades da ordem de 60%.

A Figura 3 ilustra as curvas de compactação para as energias normal, intermediária e modificada. Também são descritas as curvas de saturação do material em estudo nas faixas de 70 a 100%.

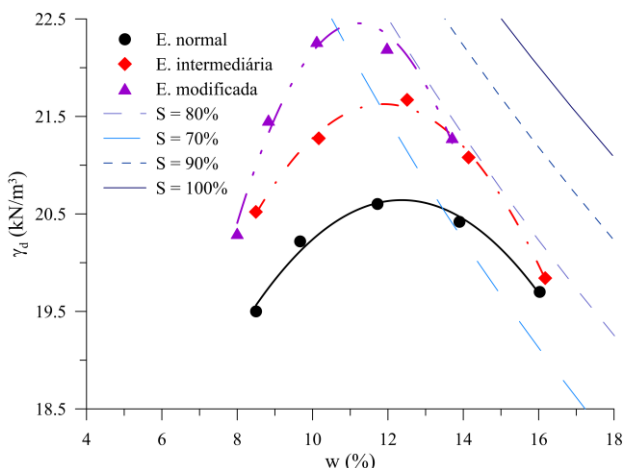


Figura 3. Curvas de compactação do rejeito de minério de cobre para diferentes energias.

A Tabela 2 exhibe os valores de peso específico aparente seco máximo (γ_{d máx}) e de teor de umidade ótimo (w_{ótimo}). É observado um aumento no peso específico seco máximo na ordem de 2 kN/m³ com elevação da energia normal para energia modificada, enquanto a umidade ótima reduz cerca de 1%.

Tabela 2. Parâmetros de compactação.

Energia	γ _{d máx} (kN/m ³)	W _{ótimo} (%)
Normal	20,6	12,4
Intermediária	21,6	11,9
Modificada	22,5	11,2

A faixa de valores de peso específico aparente seco máximo (20,6 a 22,5 kN/m³) e umidade ótima (11,2 a 12,4%) observados tomam distancia em comparação a solos siltosos convencionais (Massad, 2016). Em relação ao peso específico aparente seco máximo, os elevados valores têm correlação direta com o alto peso específico real dos grãos. Logo, para um comparativo com outros materiais, o ideal seria a adaptação dos termos em índice de vazios para dada energia de compactação. A umidade ótima visualizada é localizada pouco acima da faixa vista para solos arenosos (entre 9 e 11%) (Pinto, 2004), estando em consonância com a classificação geotécnica constatada (material silto-arenoso).

Blotz et al. (1998) relatam a possibilidade de correlacionar cada peso específico aparente seco máximo a respectiva energia (E) empregadas, tendo como resultado a seguinte expressão (Equação 3):

$$\gamma_{d \text{ máx}} = a + b * \log E \quad (3)$$

Sendo, o parâmetro “a” o intecepto de peso específico aparente seco e o parâmetro “b” um coeficiente de inclinação da reta definida pela equação. De acordo com as prescrições da NBR 7182 (ABNT, 2016), para as energias de compactação normal, intermediária e modificada têm-se valores de 58,4 kJ/m³, 128,1 kJ/m³ e 283,5 kJ/m³, respectivamente. A Figura 4 ilustra a correlação entre os parâmetros supracitados.

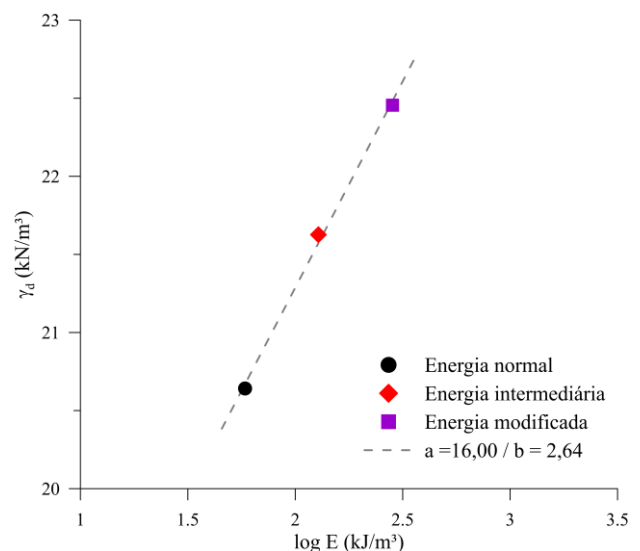


Figura 4. Peso específico aparente seco máximo em função de energia Proctor de compactação.

O parâmetro “a” indica que para uma situação de energia de compactação tendendo a zero, o peso específico aparente seco máximo seria da ordem de 16,0 kN/m³, sendo crescente somente mediante a acréscimos de níveis de energia.

O parâmetro “b” apresenta um coeficiente de elevação da compactidade do material com acréscimo da energia de compactação. Pinto (2004) constata que o coeficiente de inclinação da reta (b) tende a apresentar valores maiores para solos com maiores frações granulométricas finas. O autor destaca que a razão entre peso específico seco máximo na energia normal e na energia modificada para solos argilosos é da ordem de 90%, enquanto para solos arenosos é da ordem de 95%. No presente estudo, a razão verificada é da ordem de 92%, indicando uma meio termo entre as duas referências supracitadas, possivelmente relacionado a composição granulométrica se situar no mesmo intervalo entre essas frações extremas (material geotécnico silto-arenoso).

O ensaio de permeabilidade com cargas constante variável apresentou valores de $3,4 \times 10^{-7}$ e $3,0 \times 10^{-7}$ m/s, respectivamente, para um peso específico aparente seco de $20,6 \text{ kN/m}^3$. Mesmo com procedimentos distintos, o resultado foi semelhante, com média de $3,2 \times 10^{-7}$ m/s, desvio padrão de $3,2 \times 10^{-8}$ m/s e coeficiente de variação (razão entre desvio padrão e média) de 10%.

Segundo Neves (2016), a média dos valores observados encontra-se na faixa de dados observados para solos siltosos (de 10^{-6} a 10^{-9} m/s), estando em consonância com o resultado observado nas classificações desenvolvidas.

As curvas tensão-deslocamento desenvolvidas a partir do ensaio de cisalhamento direto são ilustradas na Figura 5. Inicialmente, é necessário destacar o comportamento mecânico definido para as três tensões normais aplicadas, em que há um aumento da tensão cisalhante com elevação do deslocamento horizontal até atingir um ponto específico (tensão cisalhante de pico), a partir deste ponto constata-se uma redução da tensão cisalhante com continua deformação horizontal até a estabilização da resistência em um determinado nível de tensão (tensão cisalhante residual).

A Figura 6 exibe a relação entre as tensões normais aplicadas e as tensões cisalhantes verificadas. A partir do critério de ruptura de Mohr-Coulomb, ajustada a reta de Coulomb, é constatado que o material apresenta intercepto coesivo (c) nulo e ângulo de atrito de pico (ϕ_{pico}) de $35,8^\circ$. Tal constatação é correlata ao estudo desenvolvido por Hu et al. (2017) envolvendo rejeitos de cobre.

Com base na tensão cisalhante residual observada na Figura 5, tomando como referência a Equação 2, o ângulo de atrito residual (ϕ_{residual}) é da ordem de $34,4^\circ$. Nesta condição, devido a elevada deformação imposta, o material está desestruturado, sendo ângulo de atrito (residual) não mais correlacionado com a compactidade do espécime.

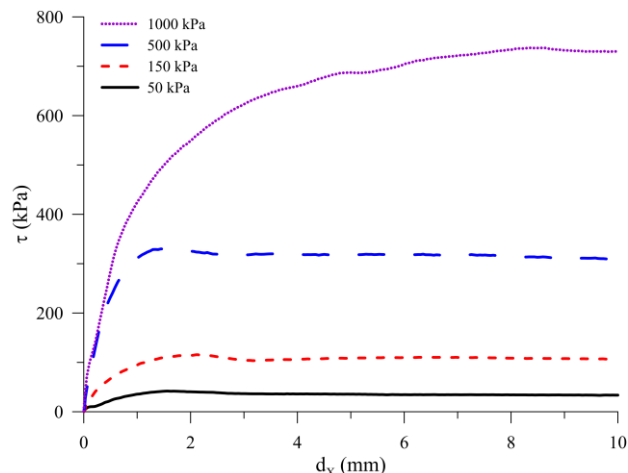


Figura 5. Comportamento tensão-deslocamento de rejeito de cobre submetido a ensaio de cisalhamento direto.

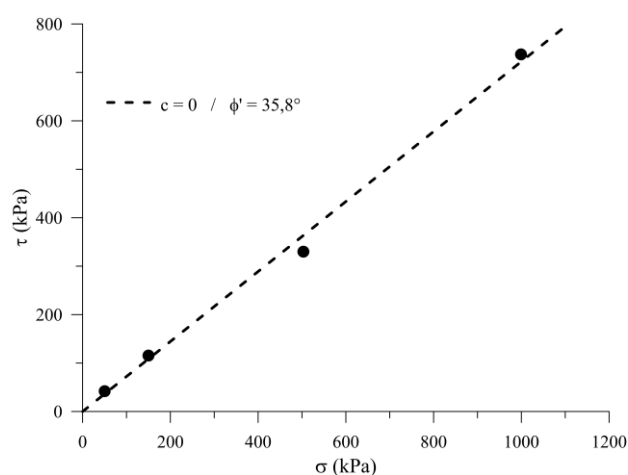


Figura 6. Envoltória de ruptura pelo critério de Mohr-Coulomb no plano tensão normal-tensão cisalhante.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo de distribuição de granulométrica permitiu verificar que o rejeito de minério de cobre tem frações de grãos análogas a um solo silto-arenoso com presença de argilas. Os métodos de classificação tradicionais (TRB e SUCS) e a metodologia desenvolvida por McLeod & Bjelkevik (2017) corroboram com esta observação.

Mediante os ensaios de compactação (*i.e.*, índice de vazios máximo e compactação Proctor) desenvolvidos, observa-se níveis mais elevados de peso específico aparente seco quando comparados a solos de mesma granulometria, sendo este efeito resultante do alto peso específico real dos grãos. Para um comparativo ideal entre distintos materiais indica-se o uso de índice de vazios.

O comportamento mecânico do rejeito de cobre submetido a ensaios de cisalhamento direto constata valores de ângulos de atrito de pico e residual de $35,8$ e $34,4^\circ$, respectivamente. Não foi verificado intercepto coesivo.

O presente estudo constata a necessidade de estudo de rejeitos de mineração submetido a diferentes métodos e técnicas. Tal condição permite garantir uma maior segurança para aplicações geotécnicas de campo.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Mineração (2020). *Anuário Mineral Brasileiro: Principais substâncias metálicas*. 30 p.
- American Society for Testing and Materials. D2487 (2017): *Standard practice for classification of soils for engineering purposes*.
- American Society for Testing and Materials. D3080 (2011): *Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions*.
- American Society for Testing and Materials. D3282 (2015): *Standard practice for classification of soils and soil-aggregate mixtures for Highway construction purposes*.
- Araújo, C. B. (2006). *Contribuição ao estudo do comportamento de barragens de rejeito de mineração de ferro*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – PPGEC, UFRJ, Rio de Janeiro. 143 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6458 (2016): *Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8mm – Determinação da massa específica, massa específica aparente e da absorção de água*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459 (2016): *Solo – Determinação do limite de liquidez*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6502 (1995): *Rochas e solos – Terminologia*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180 (2016): *Solo – Determinação do limite de plasticidade*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181 (2016): *Solo – Análise granulométrica*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182 (2016): *Solo – Ensaio de compactação*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13292 (2021): *Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16840 (2020): *Solo – Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos*.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16843 (2020): *Solo – Determinação do índice de vazios mínimo de solos não coesivos*.
- Blotz, L. R. et al. (1998). *Estimating optimum water content and maximum dry unit weight for compacted clays*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v. 124, n. 9.
- Bolton, M. D. (1986) – A guide to soil mechanics, M. D. & K. Bolton. Queen Edith's Way, Cambridge, UK.
- Carneiro, A.; Fourie, A. B. (2018). *A conceptual cost comparison of alternative tailings disposal strategies in Western Australia*. In: RJ Jewell & AB Fourie (eds), Proceedings of the 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Australian Centre for Geomechanics, Perth. Anais... p. 439-454.
- Carrera, A. et al. (2011). *Influence of grading on the mechanical behaviour of Stava tailings*. Géotechnique, v. 61, n. 11, p. 935-946.
- Consoli, N. C. et al. (2022). *Behaviour of compacted filtered iron ore tailings-Portland cement blends: New Brazilian trend for tailings disposal by stacking*. Applied Sciences (MPDI), v. 12.
- Espósito, T. J. (2000). *Metodologia probabilística e observacional aplicada a barragens de rejeito construídas por aterro hidráulico*. Tese (Doutorado em Geotecnia) – UnB, Brasília. 363 p.
- Hua, Y. et al. (2017). *The use of red mud as na immobiliser for metal/metalloid-contaminated soil: A review*. Journal Of Hazardous Materials, Elsevier BV, 325, p. 17-30.
- Instituto Brasileiro de Mineração. (2016). *Gestão e manejo de rejeitos da mineração*. Brasília, 128 p.
- International Commission On Large Dams. (2001). *Tailings dams: Risk of dangerous occurrences, lessons learnt from practical experiences*. Paris: ICOLD, 114 p.
- Lambe, T. W.; Whitman, R. V. (1968) – *Soil mechanics*, John Wiley & Sons, New York.
- Li, W.; Coop, M. R. (2019). *Mechanical behaviour of Panzhihua iron tailings*. Canadian Geotechnical Journal, v. 56, n. 3, p. 420-435.
- Luz, A. B.; Lins, F. A. F. (2018). *Tratamento de minérios: Introdução ao tratamento de minérios*.
- Mafessoli, M. et al. (2023). *Response of artificially cemented iron ore tailings for dry stacking disposal over a range of stresses*. Indian Geotechnical Journal.
- Massad, F. (2016). *Mecânica dos solos experimental*. Oficina de Textos, São Paulo.
- McLeod, H.; Bjelkevik, A. (2017). *Tailings dam design: Technology update (ICOLD Bulletin)*. In: Proceedings of the 85th Annual Meeting of International Commission on Large Dams. Prague, Czech Republic: Czech National Committee on Large Dams.
- Morgenstern, N. R. et al. (2016). *Fundão tailings dam review panel. Report on the immediate causes of the failure of the Fundão Dam*.
- Neves, E. M. (2016). *Mecânica dos estados críticos: Solos saturados e não saturados*. IST Press.
- Pinto, C. S. (2006). *Curso básico de mecânica dos solos*. 3^o ed. Oficina de Textos, São Paulo.
- Robertson, P.K. et al. (2019). *Report of the expert panel on the technical causes of the failure of Feijão Dam I*. Expert Panel Technical Report.
- Senft, D. et al. (2011). *Comparison of particle size distributions obtained by laser diffraction and sieve-hydrometer methods for oil sand tailings*. In: Pan-Am CGS Geotechnical Conference, Toronto. Anais... Toronto, Canadá: Canadian Geotechnical Society.
- Servi, S. P. et al. (2022). *Mechanical response of filtered and compacted iron ore tailings with different cementing agents: Focus on tailings-binder mixtures disposal by stacking*. Construction and Building Materials, Elsevier BV, 349, 1-14.
- World Information Service on Energy. Uranium Project. (2023). Disponível em: <http://www.wise-uranium.org/mdaf.html> (acesso em 14/12/2022).