

Comportamento Mecânico e Hidráulico de Rejeito de Minério de Cobre Compactado na Energia do Proctor Modificado

Marcela Corrêa dos Santos

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

Saymon Porto Servi

Docente do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS), Rio Grande/RS, Brasil, saymon_servi@hotmail.com

Karina Retzlaff Camargo

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

RESUMO: O processo de mineração em sua etapa de beneficiamento busca viabilizar a obtenção do mineral de interesse, tendo como resultante do processo, a geração de materiais sem valor comercial, comumente conhecidos como rejeitos de mineração. O material residual necessita de um destino final, geralmente sendo acondicionado em as barragens de contenção e/ou pilhas de rejeito. O conhecimento do comportamento geotécnico do rejeito de mineração é de fundamental importância para o correto dimensionamento destas estruturas utilizadas como depósitos, tendo em vista que os acidentes causados por esse tipo de obra e material podem resultar em imensuráveis desastres em seu entorno. O rejeito de mineração é um material de aparência muito semelhante a um solo convencional, porém seu comportamento não necessariamente será análogo ao de um solo de mesma faixa granulométrica, considerando que não possui origem pedológica. Desta forma, este trabalho tem como objetivo analisar um rejeito de minério de cobre de granulometria semelhante à de um solo silte arenoso, sob elevada energia de compactação, observando aspectos de comportamentos mecânicos e hidráulicos, a partir de carregamento unidimensional e permeabilidade, respectivamente. A análise dos resultados obtidos resulta em parâmetros de permeabilidade que se encontram dentro da faixa de valores esperados para solos siltosos, traçando um comparativo entre o comportamento do rejeito e destes, além de não evidenciar comportamento adensável.

PALAVRAS-CHAVE: Condutividade hidráulica; Adensamento unidimensional; Compressibilidade; Material geotécnico não convencional.

ABSTRACT: The mining process in its processing stage seeks to make it possible to obtain the mineral of interest, resulting in the generation of materials with no commercial value, commonly known as mining tailings. The residual material needs a final destination, generally being stored in containment dams and/or tailings piles. Knowledge of the geotechnical behavior of mining waste is of fundamental importance for the correct dimensioning of these structures used as deposits, considering that accidents caused by this type of work and material can result in immeasurable disasters in their surroundings. Mining waste is a material very similar in appearance to conventional soil, but its behavior will not necessarily be analogous to that of a soil of the same particle size range, considering that it does not have a pedological origin. Therefore, this work aims to analyze a copper ore tailing with a particle size similar to that of a sandy silt soil, under high compaction energy, observing aspects of mechanical and hydraulic behavior, based on one-dimensional loading and permeability, respectively. The analysis of the results obtained results in permeability parameters that are within the range of values expected for silty soils, drawing a comparison between the behavior of the tailings and these, in addition to not showing consolidation behavior.

KEYWORDS: Hydraulic conductivity; One-dimensional consolidation; Non-textbook geotechnical material.

1 INTRODUÇÃO

O processo de mineração consiste em uma sequência de etapas que abrangem diversas áreas do conhecimento com o objetivo final de extrair e utilizar o minério explorado com o máximo de aproveitamento de suas propriedades específicas. Segundo Luz e Lins (2018), a rocha da qual o mineral é extraído pode conter um ou mais minerais de interesse e além disto, o processo de extração do mineral traz consigo não somente os minérios de interesse comercial, mas também uma parcela a qual não possui interesse econômico, comumente identificados como rejeitos de mineração. O processo que origina duas parcelas de material chama-se beneficiamento, que através de processos em cadeia produtiva (*e.g.*, britagem, moagem, floculação) realiza a separação entre minério e rejeito. Neste cenário, é necessário o acondicionamento da fração de rejeito em local seguro, em geral sendo utilizadas as barragens de contenção ou pilhas filtradas e compactadas.

Segundo Vick (1983), o termo rejeito pode ser considerado uma nomenclatura genérica a qual refere-se a qualquer tipo de resíduo de mina, processo de extração e formação, considerando que os resíduos sólidos provenientes do processo de mineração podem ter diferentes denominações que se diferem de acordo com seu processo de extração, origem e granulometria. O rejeito em sua maioria possui uma granulometria composta predominantemente por material fino devido aos processos de fragmentação que passa durante o beneficiamento do minério, sendo este material uma mistura de diferentes minerais que compõe a rocha de origem e apresentando uma heterogeneidade química na sua composição. Por este motivo a compreensão inicial do comportamento mecânico e hidráulico do rejeito deve ser analisada de forma rigorosa, considerando que as barragens e pilhas utilizadas para a disposição final do rejeito são obras geotécnicas de alta complexibilidade e exigem o conhecimento prévio do material e seu comportamento.

O Brasil possui grandes reservas de diferentes tipos de minério (cobre, ouro, alumínio, ferro, entre outros) espalhadas em seu território e, segundo Barreto (2001), por este fato é um dos seis países mais importantes na área da mineração, e em consonância a isto possui elevadas quantidades de rejeito que necessitam de um destino final. Recentes incidentes causados por rupturas de barragens no país como a barragem do Fundão e do Córrego do Feijão, ambas em Minas gerais, são exemplos do grande impacto ambiental e social que a falha nas obras de disposição de rejeitos pode causar. A fim de remediar os incidentes envolvendo barragens de rejeito, os estudos utilizando este material vem ganhando destaque nos últimos anos.

Neste contexto, este trabalho tem como objetivo contribuir com os estudos sobre rejeitos de mineração, dando continuidade ao trabalho apresentado por Servi *et al.* (2023), o qual estuda um rejeito de minério de cobre proveniente do estado do Pará através de ensaios de caracterização geotécnica, e ensaios Proctor de compactação. O material estudado pelos autores contém uma composição granulométrica semelhante a um solo silto-arenoso, com peso específico real dos grãos de 34 kN/m^3 e sem indicativo de plasticidade. Em relação aos parâmetros Proctor de compactação, foram realizados ensaios nas três energias, resultando em valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima de compactação, respectivamente, de $20,6 \text{ kN/m}^3$ e $12,4\%$ para a energia normal, $21,6 \text{ kN/m}^3$ e $11,9\%$ para a energia intermediária e $22,5 \text{ kN/m}^3$ e $11,2\%$ para energia modificada. Com o intuito de dar continuidade à pesquisa com este rejeito de mineração, o trabalho objetiva investigar o comportamento do material sob aspectos de permeabilidade e consolidação unidimensional na energia do Proctor modificado.

2 METODOLOGIA

O rejeito de mineração de cobre utilizado foi enviado ao Laboratório de Geotecnia e Concreto Prof. Dr. Claudio Renato Rodrigues Dias da Universidade Federal do Rio Grande (LGC/FURG) com elevado teor de umidade, sendo está a condição em que o material se encontrava em campo. No laboratório o material foi submetido ao processo de secagem em estufa e destorroamento, sendo posteriormente armazenado em local seco e sem contato com agentes externos.

Nos ensaios de permeabilidade e adensamento oedométrico realizados neste trabalho foram utilizados os dados apresentados por Servi *et al.* (2023) de peso específico aparente seco máximo ($\gamma_{d \text{ máx}}$) e umidade ótima ($w_{ót}$) obtidos para a energia do Proctor modificado. É importante ressaltar que o rejeito de mineração é classificado como um material geotécnico não convencional devido ao seu processo de formação não ter

origem pedológica. Porém, segundo Servi *et al.* (2023), ensaios empregados para análises do comportamento de solos convencionais podem ser utilizados para obter as propriedades geomecânicas do rejeito de mineração.

2.1 Ensaio de permeabilidade

A permeabilidade de um material geotécnico é definida através do chamado coeficiente de permeabilidade (k), que é expresso em termos de velocidade e quantifica a facilidade com que a água percola pelo material saturado quando submetida a um gradiente hidráulico. Este é um parâmetro de grande relevância para obras de engenharia, através do conhecimento da permeabilidade do material é possível, por exemplo, determinar o fluxo em barragens e realizar estudos de estabilidade. Dentre outras possibilidades, a determinação do coeficiente de permeabilidade pode ser feita através dos ensaios de permeâmetro à carga variável e à carga constante. A escolha entre estes dois ensaios é baseada na orientação estabelecida pelas normas que os regem. A utilização do ensaio de permeabilidade à carga constante (ABNT NBR 13292, 2021) para solos granulares e a realização do ensaio de permeabilidade à carga variável (ABNT NBR 14545, 2021) para solos finos.

O rejeito de minério de cobre em questão foi caracterizado como um material fino por Servi *et al.* (2023), com fração de argila e silte da ordem de 51,1%. Porém, apesar da granulometria apresentada o material não se classifica como um material geotécnico convencional e, por esta razão, decidiu-se realizar o ensaio de permeabilidade para as duas condições de aplicação de carga, a fim de comparar e, assim, interpretar os resultados obtidos.

Baseando-se na NBR 7182/16 e utilizando diretamente o molde do permeâmetro, o rejeito foi compactado na energia do Proctor modificado de forma dinâmica utilizando os valores de peso específico aparente seco máximo e umidade ótima de 22,5kN/m³ e 11,2%, respectivamente. Após a compactação, uma camada drenante composta por brita foi adicionada ao topo do molde do permeâmetro, no qual foram instalados um sistema de torneira e dreno, o que permitiu a circulação de um fluxo de água ascendente por 24h para a saturação do material, etapa necessária para garantir um fluxo de água constante através do rejeito compactado durante o ensaio. Este procedimento foi seguido tanto para os ensaios à carga variável, quanto à carga constante. A Figura 1 apresenta o sistema de montagem utilizado para ambos ensaios de permeabilidade aqui apresentados.



Figura 1 – Sistema de montagem dos ensaios de permeabilidade

2.1.1 Ensaio de permeabilidade a carga variável

Com o material devidamente saturado pelos procedimentos anteriores, o permeâmetro foi desconectado da torneira que fornece a água para a saturação e, em seguida, conectado a uma bureta de diâmetro conhecido (0,81 cm), a qual foi preenchida com água até uma carga hidráulica de 140 cm. O fluxo de água que a bureta submete o permeâmetro é ascendente, sendo a saída do molde conectada a uma proveta onde foram feitas leituras a cada 10 cm de carga hidráulica percolada. A determinação do coeficiente de permeabilidade para o ensaio a carga variável é feita através da Equação 1.

$$k = \frac{2,3 * a * L}{A * \Delta t} * \log \left(\frac{h_i}{h_f} \right) \quad (1)$$

Onde:

a – Área da bureta;
L – Altura da amostra;
A – Área da amostra;
 Δt – Tempo de ensaio;
 h_i – Altura inicial medida na bureta;
 h_f – Altura final medida na bureta.

2.1.2 Ensaio de permeabilidade a carga constante

Para a realização do ensaio a carga constante foram utilizados bureta e proveta para a coleta do fluxo de água percolado, atingindo uma carga hidráulica de 144 cm na bureta de 0,81 cm de diâmetro. A carga hidráulica foi mantida constante a 144 cm durante todo o ensaio, recebendo alimentação constante pela torneira a qual fica conectada. Realizaram-se leituras no tempo a cada 25 mL de água percolada em fluxo ascendente até que o tempo de leitura se tornasse constante. A Equação 2 expressa o cálculo do coeficiente de permeabilidade.

$$k = \frac{t * L}{V * h * A} \quad (2)$$

Onde:

t – Tempo de ensaio;
L – Altura da amostra;
V – Volume da amostra;
h – Carga hidráulica;
A – Área da amostra.

2.2 Ensaio de adensamento

O volume total do rejeito é composto por partículas sólidas de material e pelo volume dos vazios, o qual pode estar ocupado com água e ar. Assim, ao compactar o material as partículas acomodam-se nos vazios de forma a reduzir seu volume com a expulsão destes elementos de seus vazios. O processo de redução de volume pela eliminação de água dos vazios é chamado de adensamento. Essa redução de volume se dá no tempo e é está relacionada à variação do índice de vazios, pela variação tensão efetiva no maciço de rejeito devido a diminuição da propressão na água intersticial.

O estudo das deformações no solo é fundamental para o dimensionamento de obras geotécnicas como as barragens e pilhas de rejeito, sendo estas análises dadas a partir de ensaios de adensamento oedométrico, o qual é normatizado pela NBR 16853 (ABNT, 2020). O ensaio de adensamento oedométrico consiste na aplicação de uma carga vertical em um corpo de prova confinado lateralmente, sendo feitas medidas no tempo das deformações verticais sofridas pelo material. Os parâmetros geotécnicos obtidos pelo ensaio são:

coeficiente de adensamento (c_v), o qual corresponde à taxa de dissipação do excesso de propressão, e dos índices de recompressão (C_r), compressão (C_c) e descarga (C_d).

O rejeito de minério de cobre foi compactado de forma estática diretamente no molde do ensaio, um anel de aço chamado de anel de adensamento, utilizando os mesmos parâmetros de compactação na Energia do Proctor Modificada de peso específico seco máximo e umidade ótima utilizados na compactação do ensaio de permeabilidade, obtidos em ensaios de compactação previamente realizados e apresentados por Servi. *et al.* (2023). Nesta etapa foram retiradas amostras do material utilizado para determinação da umidade de moldagem. O anel de adensamento utilizado tem diâmetro de 5 cm e altura de 2 cm, e após a compactação do material o anel com o material foi transferido para a célula de adensamento, onde foi adicionado o conjunto de pedra porosa e papel filtro, tanto na base, quanto no topo da amostra. O corpo de prova foi inundado assim que transferido para a célula de adensamento. Com o conjunto devidamente instalado na prensa, o deflectômetro foi ajustado e o ensaio foi iniciado aplicando uma tensão inicial de 5kPa ao corpo de prova.

O corpo de prova ficou sujeito a cada estágio de carga por um período de 24 h, no qual foram realizadas leituras de deformação no deflectômetro em intervalos pré-definidos de tempo. Os estágios de carga utilizados no ensaio foram de 5, 10, 25, 50, 100, 250, 500 e 1000 kPa. Ao final das 24h do estágio de 1000kPa foi iniciado o processo de descarregamento do corpo de prova para 500kPa e seguindo a ordem inversa de carregamento até o último estágio de 5kPa. Os resultados do ensaio permitem a construção da curva de índice de vazios em função tensão vertical efetiva aplicada nos estágios de carregamento e descarregamento da amostra. Os índices de recompressão, compressão e descarga do material são calculados a partir destes resultados, conforme apresentado na Figura 2, com base na Equação 3.

$$C_r = C_c = C_d = - \frac{\Delta e}{\Delta \log \sigma'} \quad (3)$$

Onde:

Δe – Variação de índice de vazios;

$\Delta \log \sigma'$ – Variação de tensão vertical efetiva.

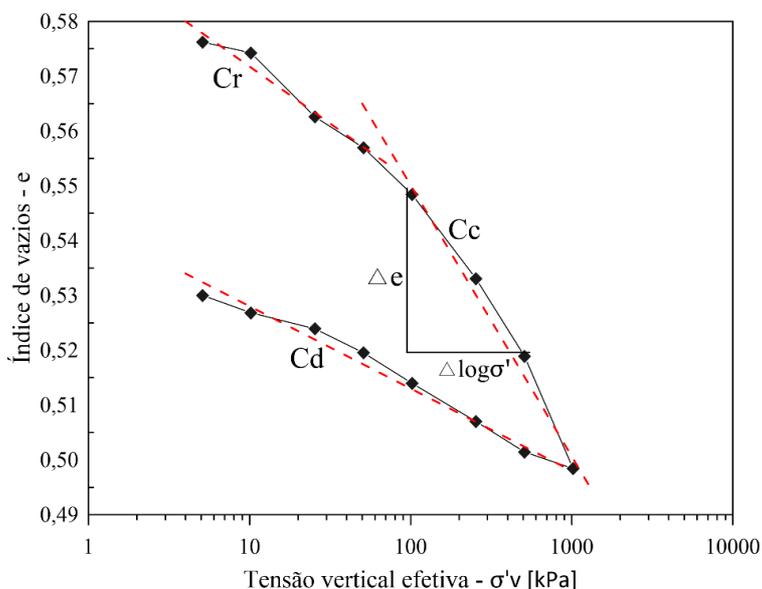


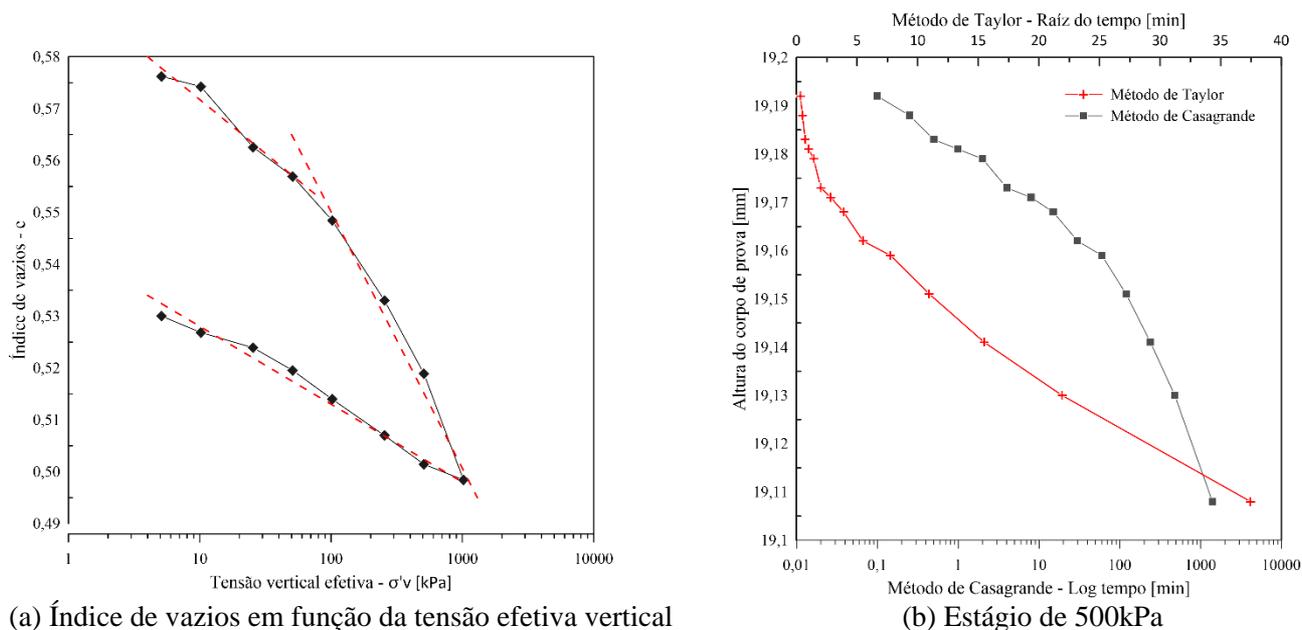
Figura 2 – Curva e x σ'_v (kPa)

O coeficiente de adensamento do material é definido a partir das leituras de altura do corpo de prova, obtidas através das deformações medidas no ensaio no tempo correspondente, estes dados geram uma curva para cada estágio de carga do ensaio. Os métodos tradicionais para a determinação deste parâmetro são, conforme Pinto (2006), os métodos de Taylor e de Casagrande.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os coeficientes de permeabilidade do rejeito de minério de cobre obtidos através dos ensaios de permeabilidade na energia do Proctor Modificado correspondentes a um índice de vazios de 0,57 foram de $1,87 \times 10^{-7}$ m/s para o ensaio a carga variável e $2,11 \times 10^{-7}$ m/s para carga constante, apresentando uma notável semelhança entre seus resultados apesar dos diferentes métodos de ensaio utilizados. Segundo Pinto (2006), um solo na faixa granulométrica dos siltes possui coeficiente de permeabilidade entre 10^{-6} a 10^{-9} m/s, considerando a granulometria do rejeito de minério de cobre ensaiado neste trabalho, os valores encontrados para coeficiente de permeabilidade em ambas as cargas vão ao encontro a referência encontrada na literatura para solos granulometricamente semelhantes a este.

Utilizando os dados obtidos no ensaio de adensamento foi construída a curva índices de vazios (e) por tensão efetiva vertical (σ_v') apresentada na Figura 3a, de onde foram retirados os valores correspondentes aos trechos atribuídos a cada um dos índices. Estes valores foram aplicados a Equação 3, resultando em um índice de recompressão (C_r) de 0,021, compressão (C_c) de 0,049 e de descarga (C_d) de 0,015.



(a) Índice de vazios em função da tensão efetiva vertical

Figura 3 – Curvas de adensamento

Através da análise dos resultados do ensaio de adensamento oedométrico não foram observadas variações significativas no volume do corpo de prova no decorrer do ensaio, sugerindo que o rejeito de minério de cobre aqui apresentado não apresenta recalque no tempo. Com isto, as curvas geradas para a determinação do coeficiente de adensamento não geraram resultados possíveis de aplicação dos métodos de Casagrande e Taylor para nenhum dos estágios de carga, já que ambos métodos são utilizados para a determinação do recalque no tempo do material. A Figura 3b apresenta as curvas de adensamento geradas pelo estágio de 500kPa, utilizando as escalas adequadas para a aplicação de ambos os métodos.

Portanto, não foi possível a determinação do coeficiente de adensamento do rejeito de minério de cobre analisado neste trabalho para nenhuma das cargas aplicadas ao material.

4 CONCLUSÕES

O ensaio de permeabilidade tornou possível a comparação entre os resultados obtidos e os valores de referência disponíveis na literatura e demonstram que o rejeito de minério de cobre deste trabalho possui comportamento hidráulico dentro da faixa de valores esperados. Em relação ao ensaio de adensamento, como citado no capítulo anterior, os resultados apresentados pelo rejeito não geram uma curva com definição para que sejam utilizados os métodos de Casagrande ou Taylor, impossibilitando a análise do coeficiente de adensamento do material. Este fato se dá pelo motivo do material apresentar certa compressibilidade, como o indicado pela análise do gráfico apresentado na Figura 2, porém não apresentar características de deformabilidade no tempo relevantes, concluindo-se então que o rejeito de minério de cobre aqui estudado não possui recalque significativo.

A realização de ensaios convencionais aplicados a materiais não convencionais, como o rejeito, é relevante no sentido de entender o comportamento do material e poder compará-lo a algo já conhecido, como um solo. Estas comparações oferecem caminhos ferramentas que permitem chegar a conclusões sobre os parâmetros do rejeito de minério. Considerando a importância do estudo dos rejeitos de mineração nos dias atuais, pretende-se dar seguimento a este trabalho analisando outras características deste rejeito de minério de cobre, afim de tornar o acervo de informações sobre o material o mais completo possível.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2016). NBR 7182. Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 13292. Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares à carga constante. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2021). NBR 14545. Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos à carga variável. Rio de Janeiro.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2020). NBR 16853. Solo – Ensaio de Adensamento unidimensional. Rio de Janeiro.
- Chaves, A. P.; Barreto, M. L. (2001). Mineração e desenvolvimento sustentável: desafios para o Brasil. CETEM, Rio de Janeiro, RJ.
- Luz, A. B.; Lins, F. A. F. (2018). Tratamento de minérios: Introdução ao tratamento de minérios. CETEM, Rio de Janeiro, RJ.
- Massad, F. (2016) Mecânica dos solos experimental. Oficina de textos, São Paulo, SP.
- Pinto, C. S. (2006). Curso básico de mecânica dos solos. 3ª edição. Oficina de textos. São Paulo, SP.
- Servi, S. P., Santos, M. C., Camargo, K.R., Bastos, C. A. B., Consoli, N. C. (2023) Comportamento mecânico de rejeito de minério de cobre. Anais do X Congresso Brasileiro de Geotecnia e IX Congresso Brasileiro de Geossintéticos. Salvador, BA.
- Vick, S. G. (1983). Planning, design, and analysis of tailings dams. Wiley Interscience. New York, NY.