

ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO REJEITO DE MINÉRIO DE COBRE EM DIFERENTES ENERGIAS PROCTOR DE COMPACTAÇÃO

MARCELA CORREA DOS SANTOS¹; ISABELLA SCHNEIDER²; KARINA RETZLAFF CAMARGO³; SAYMON PORTO SERVI⁴;

¹Universidade Federal do Rio Grande (FURG) – marcelacorreasts@gmail.com

²Universidade Federal do Rio Grande (FURG) – isabs2000@gmail.com

³Universidade Federal do Rio Grande (FURG) – karinacamargo@furg.br

⁴Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IFRS) – saymon_servi@hotmail.com

1. INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade fundamental na economia brasileira, sendo o país um importante exportador de minérios. Entretanto, a mineração gera um subproduto final chamado de rejeito, o qual, segundo Servi *et al.* (2023), é definido como sendo composto de fragmentos de rocha, componentes químicos específicos do minério explorado e a água utilizada no processo. O elevado volume deste subproduto se não disposto corretamente pode gerar grandes riscos ambientais, e atualmente um dos destinos mais utilizados para este material são as barragens de rejeito, que exigem o conhecimento das propriedades do material para que sua construção seja possível.

Assim, o material de estudo deste trabalho se trata então do subproduto da mineração do cobre, o rejeito de minério de cobre. Para que este material seja utilizado na construção de barragens ou também em outras aplicações geotécnicas, uma propriedade relevante a ser estudada é a condutividade hidráulica (k) do material, parâmetro que é, então, o foco de estudo neste trabalho. Para esta análise foram realizados ensaios de permeâmetro com diferentes energias Proctor de Compactação, com o objetivo de determinar a melhor condição de disposição do material em campo.

2. METODOLOGIA

O rejeito foi inicialmente seco em estufa e destorradado, ficando pronto para então ser compactado em três diferentes energias de compactação: (i) 90% da Energia do Proctor Normal, (ii) Energia do Proctor Normal e (iii) Energia do Proctor Modificada. A utilização de 90% da Energia do Proctor Normal para os ensaios é um fator relevante de estudo que permite a compreensão do comportamento do material caso não seja alcançada a energia de compactação *in situ*.

A caracterização do material, assim como os valores de peso específico aparente seco (y_d) e umidade ótima (w_{ot}) aqui utilizados para as energias Proctor Normal e Modificada de compactação são dados apresentados e comentados em Servi *et al.* (2023). Para a compactação em 90% da Energia do Proctor Normal o peso específico seco utilizado foi 90% do valor determinado para a Energia Normal. Já para encontrar a umidade ótima nesta energia foi necessário realizar uma aproximação de reta no gráfico das curvas de compactação obtidas nos ensaios realizados em Servi *et al.* (2023), através da Equação 1.

$$w_{otimo} = 31,805 - yd_{max} \times 86,036 \quad (1)$$

As compactações foram realizadas com base na NBR 7182 (ABNT 2016), utilizando para todas as energias ensaiadas o molde do ensaio CBR (*California Bearing Ratio*). Já sendo de conhecimento prévio os valores de peso específico seco e umidade ótima foram realizadas compactações estáticas para cada uma das energias e para conferir os valores de umidade dos moldes foram feitos ensaios de estufa a 60°C.

Para a análise do coeficiente de condutividade hidráulica do material pode-se utilizar dois ensaios, sendo o permeâmetro de carga variável (NBR 14545, 2021) e o permeâmetro de carga constante (NBR 13292, 2021). De acordo com as normas citadas, o uso de cada ensaio é indicado para solos finos e granulares, respectivamente. Segundo a caracterização apresentada em Servi *et al.* (2023) o rejeito de minério de cobre tem granulometria semelhante a um silte arenoso, o que sugere o uso do permeâmetro de carga variável. Porém o rejeito de mineração não se trata de um solo e sim de um material geotécnico não convencional, e então com o objetivo de comparar os resultados e entender de maneira mais aprofundada o comportamento do material foram realizados ambos os tipos de ensaios de condutividade hidráulica.

Previamente aos ensaios e já com o material compactado foi adicionada uma camada drenante composta por brita, e posteriormente feito o processo de saturação do molde através de um sistema de torneiras que permite a circulação da água em fluxo ascendente, garantindo então uma vazão constante no corpo de prova durante o ensaio.

O ensaio de permeâmetro de carga variável realizado possui uma bureta de diâmetro 0,81cm submetida a uma carga hidráulica de 140cm. Foram realizadas leituras no tempo a cada 10cm de carga hidráulica na bureta. A Equação 2 demonstra o cálculo de k utilizado.

$$k = 2,3 \frac{aL}{A\Delta t} \log \frac{hi}{hf} \quad (2)$$

Onde:

a – Área da bureta;

L – Altura da amostra;

A – Área da amostra;

Δt – Tempo de ensaio;

hi – Altura inicial medida na bureta;

hf – Altura final medida na bureta

Para o ensaio de carga constante o sistema utilizado foi o mesmo, porém neste a carga hidráulica se manteve em 144cm durante todo ensaio. As leituras foram realizadas no tempo a cada 25ml de água percolada no corpo de prova. A Equação 3 foi utilizada nos cálculos de k deste ensaio.

$$k = \frac{tL}{VhA} \quad (3)$$

Onde:

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

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 a seguir mostra os resultados encontrados após a realização dos ensaios anteriormente citados. Nela se encontram os valores de índice de vazios (e) para cada Energia Proctor de compactação e seus respectivos valores de condutividade hidráulica k .

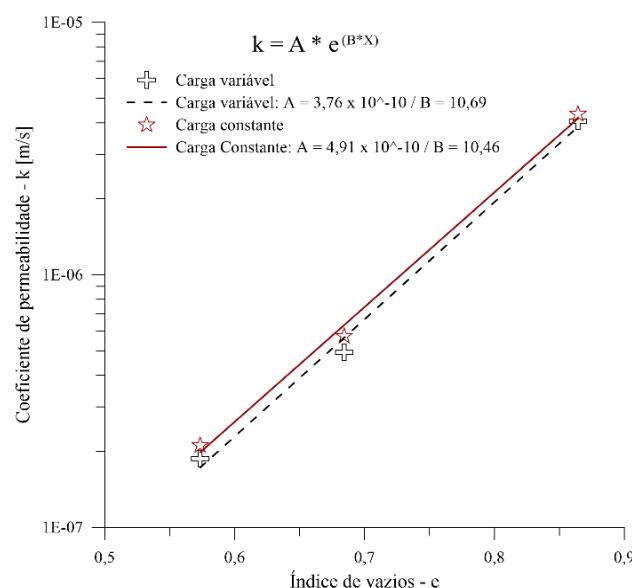
Tabela 1 – Índices de vazio e coeficientes de permeabilidade

<i>e</i>	<i>Energia</i>	<i>kvar(m/s)</i>	<i>kcte (m/s)</i>
0,86	90%EN	4,06E-06	4,33E-06
0,68	EN	4,94E-07	5,71E-07
0,57	EM	1,87E-07	2,11E-07

Fonte: Os autores

Os resultados dos ensaios estão também representados em forma de gráfico para melhor entendimento do comportamento do material. A Figura 1 mostra no eixo das abscissas valores de índices de vazios e no eixo das ordenadas os valores de coeficiente de condutividade hidráulica, evidenciando a aproximação entre os resultados em permeâmetro de carga constante e variável.

Figura 1 – Resultados dos ensaios de carga constante e variável



Fonte: Os autores

4. CONCLUSÕES

Como citado anteriormente, o rejeito de minério de cobre estudado neste trabalho possui granulometria semelhante a um solo siltoso, e segundo Pinto (2006), um silte possui coeficiente de condutividade hidráulica k na faixa de 10^{-6} a 10^{-9} m/s, logo os valores encontrados para k do rejeito ensaiado confirmam esta conexão entre o comportamento deste material não convencional e o silte diante suas características hidráulicas. Esta análise das características hidráulicas deste material é parte integrante de um projeto, que tem como objetivo a caracterização geotécnica e determinação de propriedades relacionadas à resistência, deformabilidade e permeabilidade deste material. Entende-se que estes resultados, se devidamente interpretados, tem o potencial de servir como subsídio para a análise do uso geotécnico destes rejeitos e, assim, contribuir para a diminuição do volume de rejeito a ser destinado em barragens de rejeito e ainda aprofundar a compreensão do comportamento deste material como material construtivo destas barragens.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3^a edição. São Paulo/SP: Oficina de textos, 2006.

SERVI, S. P. *et al.* Comportamento mecânico de rejeito de minério de cobre. **Anais do X Congresso Brasileiro de Geotecnica e IX Congresso Brasileiro de Geossintéticos**. Salvador/ BA. 2023.