

XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

CARACTERIZAÇÃO DE AMOSTRAS DO *SUMP* DE UMA ÁREA DE MINERAÇÃO

*Rian Francisco Guedes Couto*¹; *Athos de Melo Pimentel*²; *Nicolas Matheus Geara Gomes*³; *Edna Maria de Faria Viana*⁴; *Keila Cristina Fernandes de Oliveira Dourado*⁵; *Francisco Antunes Guimarães Rodrigues*⁶ & *Jorge Luis Zegarra Tarqui*⁷

Abstract: The particle size characterization of sediments from mining sumps is essential for understanding the retention efficiency of these structures. This study focused on analyzing samples collected from the sumps of a mining area, which receive sediments originating from waste rock piles and access roads of the mining operation. The samples underwent preparation steps including disaggregation and drying, followed by tests to determine moisture content and the specific gravity of solids. Subsequently, a particle size analysis by sedimentation was performed, allowing for the determination of the mean particle diameters through the application of Stokes' law. The results showed good accuracy and there was consistency between the specific mass and granulometry analyses. The obtained particle size distribution curves revealed that most particles present in the samples are concentrated in the silt fraction, highlighting the difficulty of the sumps in retaining finer particles, especially during periods of increased surface runoff. This study contributes to the understanding of sediment behavior in these structures and provides valuable insights for the design and improvement of sediment control strategies in mining activities.

Resumo: A caracterização granulométrica de sedimentos oriundos de *sumps* de mineração é fundamental para entender a eficiência de retenção dessas estruturas. Este trabalho teve como foco a análise de amostras coletadas nos *sumps* de uma área de mineração, que recebem os sedimentos provenientes das pilhas de estéril e das vias de acesso da operação mineradora. Foram realizadas etapas de preparação, destorramento e secagem das amostras, seguidas pelos ensaios de determinação do teor de umidade e da massa específica dos sólidos. Posteriormente, realizou-se a análise granulométrica por sedimentação, permitindo a determinação dos diâmetros médios das partículas por meio da aplicação da lei de Stokes. Os resultados mostraram boa precisão e houve coerência entre as análises de massa específica e granulometria. As curvas granulométricas obtidas evidenciaram que a maior parte das partículas presentes nas amostras está concentrada nas frações de

1) Graduando em Engenharia Ambiental da UFMG, Avenida Antônio Carlos 6627 Campus Pampulha BH MG. riancouto04@gmail.com

2) Graduando em Engenharia Ambiental da UFMG, Avenida Antônio Carlos 6627 Campus Pampulha BH MG. athos.ufmg@gmail.com

3) Graduando em Engenharia Civil da UFMG, Avenida Antônio Carlos 6627 Campus Pampulha BH MG. nicolasgeara@gmail.com

4) Prof. Titular da UFMG, Avenida Antônio Carlos 6627 Campus Pampulha BH MG. ednamfv@ufmg.br

5) Engenheira Sênior Recursos Hídricos da VALE, Edifício Concórdia Corporate 34006-049, Nova Lima - MG, keila.oliveira@vale.com

6) Engenheiro da PROGEN da VALE, Rua Matias Cardoso, nº 169 - 5º andar, Santo Agostinho, BH - MG, francisco.rodrigues@progen.com.br

7) Prof. Associado da UFMG, Avenida Antônio Carlos 6627 Campus Pampulha BH MG. jlztarqui@yahoo.com.br

silte, o que reforça a dificuldade dos *sumps* em reter partículas mais finas, principalmente durante períodos de maior escoamento superficial. Este estudo contribui para a compreensão do comportamento dos sedimentos nestas estruturas e fornece dados para o dimensionamento e aprimoramento de estratégias de controle de sedimentos em atividades de mineração.

Palavras-Chave – Massa específica, sedimentação, *sump*.

INTRODUÇÃO

Um dos grandes aspectos associados à mineração é a geração de material particulado, que pode causar alguns impactos como alteração da qualidade do ar ou da qualidade da água de corpos hídricos ao redor de uma mina.

Dentre as formas encontradas para mitigar estes impactos está a criação dos *sumps* — do inglês, reservatórios — que são alocados a jusante dos sistemas de drenagem na mineração e funcionam como uma bacia de retenção de sedimentos. O funcionamento de um *sump* se baseia em aumentar o tempo de retenção das águas de drenagem e consequentemente diminuir sua velocidade de escoamento, o que permite que os sedimentos presentes se depositem no fundo do reservatório antes que a água continue seu percurso.

Em uma área de mineração, este sistema é utilizado para conter os sedimentos provindos das vias de acesso e das pilhas de estéril. É durante o período chuvoso que esses *sumps* atuam com maior importância, porém, devido ao grande escoamento de água durante eventos de precipitação, nem sempre os *sumps* são capazes de conter todos os sedimentos carreados, principalmente, da pilha de estéril, o que pode ser prejudicial para ecossistemas aquáticos próximos.

É neste sentido que este trabalho visa estudar as características dos sedimentos que são retidos nestes *sumps* da área de mineração, para entender suas propriedades e determinar sua composição granulométrica. Conhecendo o tamanho dos grãos nas amostras, é possível inferir, por exemplo, qual tamanho dos grãos está efetivamente sendo retido nos *sumps*, enquanto os grãos menores, por demandarem um maior tempo de deposição, continuam sendo carreados pela água às regiões mais a jusante.

Para elaborar a curva granulométrica das amostras, foi preciso antes determinar seus respectivos teores de umidade e massa específica dos sólidos. Os resultados obtidos apresentaram boa precisão e ao final do trabalho foi possível traçar a curva granulométrica e elaborar algumas relações com a capacidade de retenção dos *sumps*.

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos testes de caracterização do estéril, selecionou-se 3 amostras que, por apresentarem um elevado teor de umidade, foram inicialmente separadas em bandejas e secas ao sol. Após ficarem suficientemente secas (próximas a umidade do ar), elas foram manualmente destorreadas com o uso do almofariz e a mão de gral. A Figura 1 mostra como os grãos maiores ficam após serem destorreados com esse equipamento.

Figura 1 - Parcada de material sendo destorroada em grãos mais finos após a secagem.



Em seguida, realizou-se o ensaio para a determinação do teor de umidade das amostras, utilizando-se uma estufa de secagem, peneira com abertura de 2 mm, uma balança analítica com precisão de 0,01 gramas e 6 cápsulas de igual tamanho. Usou-se para os testes apenas a parcada das amostras que passaram na abertura de 2 mm. Conforme a orientação presente na norma da ABNT NBR 6457 (2024), mediu-se a massa em gramas de cada cápsula individualmente (anotadas como M3), a massa da cápsula após ser adicionado cerca de 50 g de amostra (M2), e a massa da cápsula com amostra após ficarem aproximadamente 24 h na estufa a uma temperatura de 105 °C (M1). O teor de umidade w é calculado pela equação 1.

$$w = \frac{M1 - M2}{M2 - M3} \cdot 100 \quad (1)$$

A próxima etapa consistiu em determinar a massa específica da parcada passante na peneira de 2 mm, segundo as orientações da norma ABNT NBR 17212 (2025). Cerca de 50 g de solo foram pesados dentro de um bêquer de 250 mL – anotou-se essa massa como M_t – ao qual adicionou-se água destilada até a completa imersão do material. Este conjunto foi deixado em repouso por cerca de 24 horas. Passado este tempo, a amostra foi levada para um aparelho de dispersão no qual sofreu agitação durante 15 min e, após ser dispersa, foi transferida para um picnômetro de 500 mL com o auxílio de um funil de plástico e uma pisseta com água destilada.

O volume do picnômetro foi completado gradualmente com água destilada, sendo aplicada a sucção a vácuo para a remoção do volume de ar na solução durante 15 min em dois instantes – uma vez quando o nível atingiu aproximadamente metade do recipiente e outra quando se encontrava cerca de 1 cm abaixo do menisco. Feito esse procedimento, mediu-se a massa em gramas do picnômetro completo até a marca de referência (M2) e a temperatura da solução neste instante. Posteriormente, mediu-se a massa do picnômetro somente com água destilada (M1). A massa específica ρ_s , em g/cm^3 , pode ser aferida pela equação 2.

$$\rho_s = \frac{Ms \cdot \rho w(T)}{M1 - M2 + Ms} \quad (2)$$

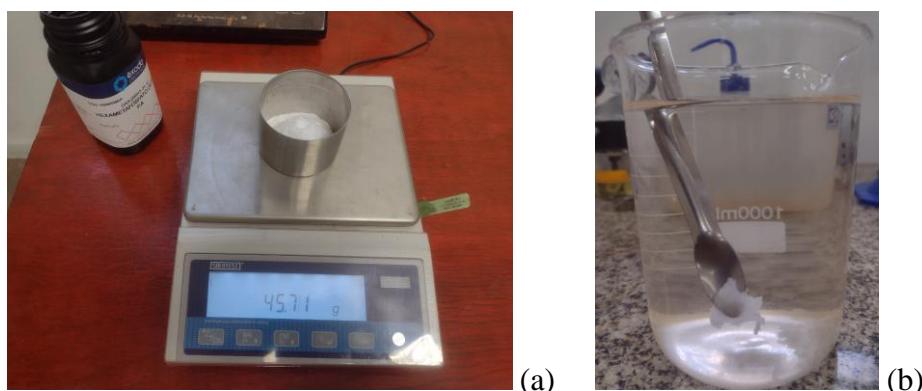
Sendo $\rho w(T)$ a massa específica da água a temperatura do ensaio (g/cm^3) e M_s a massa seca da amostra (g), que foi obtida a partir da equação 3 utilizando os respectivos teores de umidade (w) de cada amostra e a massa total (M_t) pesada para o ensaio.

$$Ms = \frac{Mt}{1+w} \quad (3)$$

O último parâmetro físico a ser determinado é o diâmetro médio e a curva granulométrica das partículas das amostras. Como o material é composto em maior parte por silte e argila, não é possível realizar essa caracterização pelo peneiramento, sendo necessário recorrer ao ensaio de sedimentação para partículas com diâmetro menor do que 0,075 mm. Para isso, seguiu-se os procedimentos descritos na norma ABNT NBR 7181 (2025).

O primeiro passo para a realização deste ensaio é preparar uma solução de defloculante, a partir da adição de 45,7 g/L de hexametafosfato de sódio em 1000 mL de água destilada, sendo feita sua mistura até a completa diluição do solvente. Desta solução, 125 mL foram adicionados em um bêquer contendo aproximadamente 70 g de amostra do *sump*. A preparação da solução de defloculante é mostrada na Figura 2.

Figura 2 - Preparação da solução de defloculante – pesagem (a) e diluição (b).



A solução de defloculante com a amostra do *sump* permaneceu em repouso por 24 horas em um bêquer de vidro de 500 mL. Após esse período, a solução foi transferida para uma proveta de 1000 mL, onde foi agitada de forma manual e depois mantida novamente em repouso para que ocorra a sedimentação das partículas. As leituras de densidade e temperatura foram realizadas no meio de suspensão (solução de água, defloculante e amostra) com um densímetro e um termômetro de mercúrio, respectivamente, nos tempos de 30s, 1min, 2min, 4min, 8min, 15min, 30min, 1h, 2h, 4h, 8h e 24h após o início da sedimentação, sendo as três primeiras leituras repetidas uma segunda vez. Entre o tempo de cada leitura, o densímetro era colocado em repouso em outra proveta de 1000 mL preenchida somente com água destilada (meio dispersor).

Desse modo, um dos métodos de aproximar o diâmetro médio das partículas é pela lei de Stokes, mostrada pela equação 4.

$$d = \sqrt{\frac{1800\mu}{p_s - p_{md}} \cdot \frac{z}{t}} \quad (4)$$

Em que d é o diâmetro máximo das partículas (mm), μ é o coeficiente de viscosidade do meio dispersor ($\text{g s} / \text{cm}^2$) a temperatura do ensaio, z é a altura de queda das partículas (cm), t é o tempo de sedimentação (s) e p_{md} é a massa específica do meio dispersor (g / cm^3) a temperatura do ensaio.

Segundo a ABNT NBR 7181, a fração percentual de material em suspensão (P) no instante da análise é obtida a partir da porcentagem de material que passa na peneira de 2mm (N) e das seguintes leituras do densímetro: na suspensão (L); em meio dispersor a mesma temperatura da suspensão (L_{md}); e em meio dispersor a 20 °C (p_{md}).

Nesse caso, como o material é constituído em sua maioria por grãos finos (silte e argila), admitiu-se um valor de 100% para N . Os parâmetros L_{md} e p_{md} foram determinados a partir da curva de calibração do densímetro, a qual foi feita medindo-se as variações dos valores de densidade em função da temperatura no meio dispersor.

A porcentagem de material em suspensão é dada pela equação 5 mostrada abaixo.

$$P = \left[\frac{100}{MS} \cdot \frac{p_s(L-L_{md})}{p_s-p_{md}} \right] \cdot N \quad (5)$$

Com base na equação 4, calculou-se o diâmetro do material em suspensão correspondente a cada leitura do ensaio de sedimentação e, por meio da equação (5), determinou-se a fração percentual de material presente em cada intervalo de diâmetro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios acima foram realizados para as 3 amostras e com isso obteve-se os seguintes resultados para o teor de umidade a massa específica de cada amostra, expostos na Tabela 1.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de teor de umidade e massa específica das amostras.

Amostra	Teor de Umidade (%)	Desvio padrão	Massa específica (g/cm ³)	Desvio padrão
1	1,43	0,05	2,23	0,10
2	2,72	0,08	2,18	0,13
3	1,24	0,14	2,50	0,10

Durante os ensaios de massa específica foi observado que uma espuma se formava durante a transferência da amostra do copo dispersor para o picnômetro e apenas uma parte desta espuma era possível ser retirada por meio da aplicação de vácuo. Na realização do primeiro ensaio, esta espuma dificultou na adição de água destilada até a marca do menisco no picnômetro. Este problema foi contornado jorrando a água com uma pisseta contra as paredes do picnômetro, para que as bolhas se dispersassem e fosse possível acertar o menisco com maior assertividade. A suposição é de que esta espuma tenha se formado pela presença de óleos ou graxas, vindas das vias de acesso, nas amostras retiradas dos *sumps*. Esta espuma pode ser observada na Figura 3.

Figura 3 – Espuma presente no picnômetro após a aplicação dos dois intervalos de vácuo.



Utilizando os valores de massa específica para cada amostra da tabela acima (Tabela 1) e com as leituras do densímetro no ensaio de sedimentação, foi possível calcular os diâmetros e as porcentagens representadas por cada diâmetro por meio das equações 4 e 5 e assim, montar uma tabela de onde foi possível plotar o gráfico da curva granulométrica. Nesta tabela, foi calculado os valores de porcentagem acumulada, indo do menor diâmetro para o maior, já que na curva granulométrica o eixo das ordenadas é representado por essa porcentagem acumulada. Um exemplo desta tabela pode ser observado abaixo (Tabela 2) para os resultados da amostra 1.

Tabela 2 – Resultados do ensaio de sedimentação para a amostra 1.

Intervalos	Dens. (g/mL)	Temp. (°C)	d (mm)	Porcentagem (%)	Porcent. acumulada (%)
30 s	1,0345	22,1	0,0486	4,63	38,08
1 min	1,0343	22,1	0,0344	4,56	33,45
2 min	1,0338	22,1	0,0245	4,43	28,88
4 min	1,0320	22,1	0,0164	3,97	24,45
8 min	1,0315	22,1	0,0117	3,83	20,49
15 min	1,0310	22,0	0,0086	3,71	16,65
30 min	1,0295	21,8	0,0062	3,33	12,94
1 h	1,0280	21,5	0,0045	2,95	9,62
2 h	1,0260	21,5	0,0033	2,42	6,66
4 h	1,0240	21,8	0,0024	1,87	4,24
8 h	1,0220	23,4	0,0017	1,20	2,37
24 h	1,0205	19,0	0,0011	1,17	1,17

É mais fácil compreender o que porquê desta representação na curva granulométrica, quando se analisa os resultados obtidos pela granulometria por peneiramento, na qual, conhecendo a massa colocada na peneira, encontra-se a porcentagem de material que passa por ela, ou seja, a porcentagem de material que apresenta um diâmetro menor que o determinado pela peneira. No caso da sedimentação, é possível interpretar os resultados de forma análoga, como no exemplo da amostra 1 (Tabela 2), a porcentagem acumulada no intervalo de 30 s mostra que 38,08% da amostra possui grãos menores que o diâmetro calculado de 0,0486 mm.

Antes de traçar a curva granulométrica foi necessário inserir o valor de porcentagem passante na peneira de abertura de 0,075 mm, que não reteu nenhuma parcela significativa de nenhuma das três amostras após o ensaio de sedimentação e por isso foi considerado que 100% do material passou por esta peneira. Finalmente, foi possível montar a curva granulométrica para as amostras 1, 2 e 3 como pode ser observado na Figura 3, Figura 4 e Figura 5, respectivamente.

Figura 3 – Curva granulométrica para a amostra 1.

Amostra 1 - Curva Granulométrica

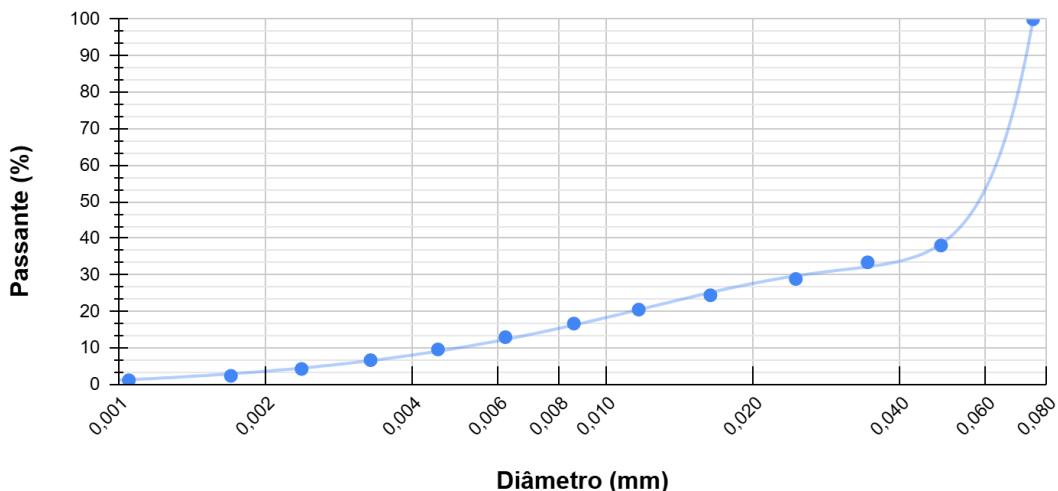


Figura 4 – Curva granulométrica para a amostra 2.

Amostra 2 - Curva Granulométrica

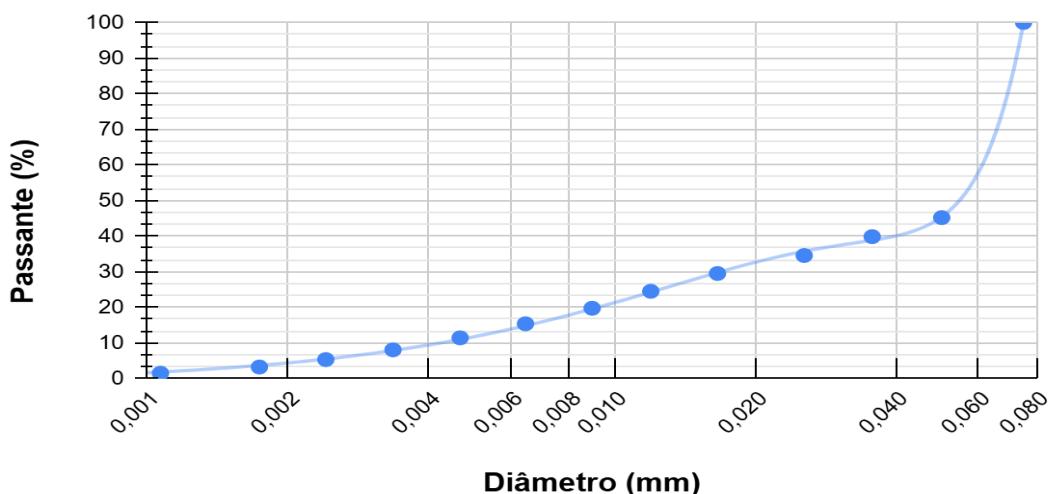
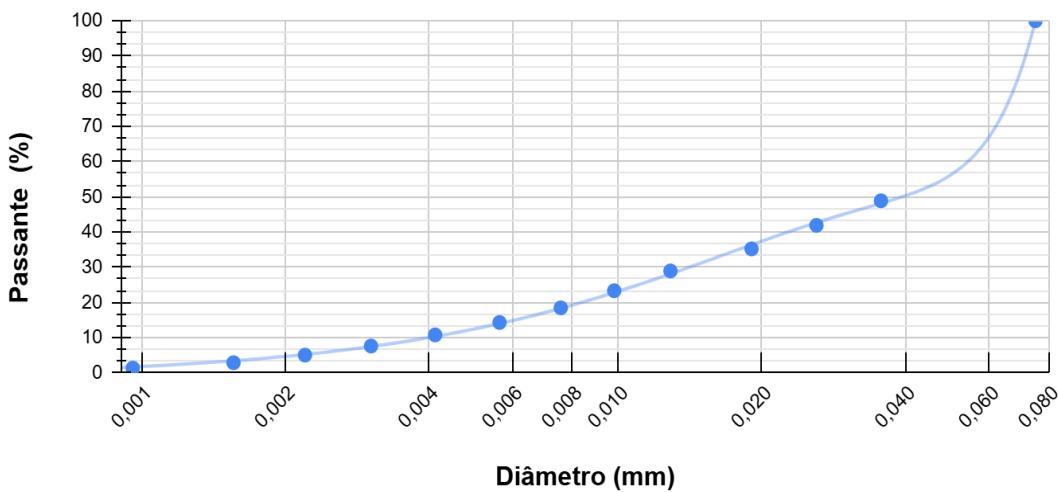


Figura 5 – Curva granulométrica para a amostra 3.

Amostra 3 - Curva Granulométrica



Observando-se as curvas granulométricas das três amostras é possível perceber que a maior parte das partículas se classificam como silte, definido pelos grãos de diâmetro entre 0,002 mm e 0,060 mm, de acordo com a norma da ABNT NBR 6502 (2022). A segunda parcela de grãos em maior quantidade se encontra entre o intervalo de 0,060 mm e 0,075 mm, que de acordo com outras classificações, inclusive utilizadas mundialmente como a ASTM D-2487 (2017), também seria considerada como silte.

É possível perceber certa coerência das curvas granulométricas quando analisamos estas juntamente com os valores de massa específica encontrados para cada amostra. A amostra 3 apresentou a maior massa específica, o que pode ser interpretado como a amostra que continha a maior quantidade de grãos por unidade de volume e consequentemente grãos menores – considerando que a composição química das três amostras sejam as mesmas. Observado a curva granulométrica da amostra 3, cerca 67% dos grãos possuem diâmetro menor que 0,060 mm, enquanto nas amostras 1 e 2 essa porcentagem é de 53% e 57%, respectivamente. Além disso, é provável que a amostra 3 tenha sido coletada na porção final do *sump*, mais próxima ao talude, por conta dessa maior presença de partículas finas.

Também existem nas três curvas granulométricas uma elevação brusca da porcentagem acumulada entre o penúltimo ponto, que representa a primeira leitura do densímetro, e o último ponto, de porcentagem 100%. Este é comportamento comum do método da sedimentação, como também foi observado no trabalho de monografia da Renata B. Capelli (2016), que apresenta como alternativa utilizar o método de granulometria à laser, que costuma apresentar curvas mais suaves para amostras muito finas.

Por último, também é possível observar que todas as três amostras apresentaram uma porcentagem de argila, definida como diâmetros menores que 0,002 mm, muito pequena. Isso pode ser explicado pela pequena velocidade de queda dessas partículas menores, que dificilmente conseguem se depositar ao fundo dos *sumps* durante o tempo de retenção das águas drenadas até eles. É este material mais fino, que não consegue ser retido pelos *sumps*, que continua sua trajetória até regiões a jusante da mineração, podendo chegar a corpos hídricos próximos.

CONCLUSÃO

A caracterização das amostras de sedimentos dos *sumps* de uma área de mineração permitiu obter informações importantes sobre as propriedades físicas desse material. Através dos ensaios de teor de umidade, massa específica e sedimentação foi possível identificar algumas diferenças entre as amostras, provavelmente relacionadas ao local de coleta destas amostras dentro do *sump*.

A análise granulométrica por sedimentação mostrou que as amostras são compostas, em sua maioria, por partículas finas, principalmente da parcela de silte. Esse resultado confirma a dificuldade que os *sumps* têm para reter um material mais fino, principalmente durante períodos de maior escoamento superficial, quando o tempo de retenção da água nas estruturas diminui.

A realização de todas as etapas experimentais seguiu procedimentos de laboratório que garantiram dados confiáveis para a construção das curvas granulométricas. Esses resultados podem servir de base para futuras análises e ajudar no planejamento de melhorias nos sistemas de controle de sedimentos da mina, contribuindo para a redução do impacto ambiental causado pelo transporte de partículas para os cursos d'água próximos.

REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. “*Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)*”. ASTM D2487, 2017. West Conshohocken: ASTM International, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457. “*Preparação das amostras para ensaio de compactação, caracterização e determinação do teor de umidade*”. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6502. “*Solos e rochas – Terminologia*”. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181. “*Solo — Análise granulométrica*”. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 17212. “*Determinação da massa específica dos sólidos da fração passante na peneira com abertura de 2mm*”. 1 ed. Rio de Janeiro: ABNT; 2025.

CAPELLI, R. B. (2016). “*Comparação de métodos na análise granulométrica de rejeitos de mineração*”. Monografia – Universidade Federal de Ouro Preto. 30 p.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à VALE pelo apoio financeiro neste trabalho. Agradecem ainda ao Centro de Pesquisas Hidráulicas e Recursos hídricos (CPH-UFMG) pelo suporte técnico.