REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

INTEGRAÇÃO ENTRE GRANULOMETRIA E GRANULOQUÍMICA PARA AVALIAÇÃO DO DESAGUAMENTO E DO EMPILHAMENTO A SECO DE REJEITOS FOSFÁTICOS

INTEGRATION OF PARTICLE SIZE DISTRIBUTION AND GRANULOCHEMICAL CHARACTERISTICS FOR DEWATERING AND DRY STACKING ASSESSMENT OF PHOSPHATE TAILINGS

INTEGRACIÓN DE LA GRANULOMETRÍA Y LA GRANULOQUÍMICA PARA LA EVALUACIÓN DEL DESAGUADO Y DEL APILAMIENTO EN SECO DE RELAVES FOSFÁTICOS

Wallisson Rafael Santos[1], Michelly dos Santos Oliveira[2], Thiago Bomjardim Porto[3], Ketlen Cristina Pereira[4], Jhenifer Cristina Pereira[4], Santiago Henrique Cruz[5], Mario Guimarães Junior[6]

https://doi.org/10.47820/recima21.v7i12.9702

PUBLICADO: 12/2026

RESUMO

A crescente necessidade de métodos mais seguros e sustentáveis para a disposição de rejeitos minerais tem impulsionado alternativas às barragens convencionais, como o empilhamento a seco. Este estudo tem como objetivo avaliar, de forma integrada, as características granulométricas e granuloquímicas de rejeitos fosfáticos provenientes de três correntes de beneficiamento mineral: fração lamosa, rejeito da flotação e material global, constituído por 20% de lama e 80% de rejeito da flotação. A metodologia compreendeu a caracterização granulométrica por peneiramento a úmido, o ajuste das distribuições pelo modelo de Rosin–Rammler e a análise química por fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda (WDXRF). Os resultados evidenciaram diferenças na distribuição granulométrica e na composição química das correntes. A fração lamosa apresentou predominância de partículas finas e ultrafinas, potencialmente desfavoráveis à drenagem, enquanto o rejeito da flotação apresentou características granulométricas mais favoráveis ao escoamento. O material global apresentou distribuição heterogênea, cuja interação entre partículas finas e grossas pode influenciar a estrutura porosa e a permeabilidade. A avaliação do potencial de desaguamento foi conduzida de forma exploratória, sem validação experimental direta dos indicadores de filtração. Conclui-se que a integração entre granulometria e granuloquímica constitui uma abordagem complementar para interpretar tendências potenciais de desaguamento, contribuindo para estudos futuros sobre filtração e empilhamento a seco.

PALAVRAS-CHAVE: Rejeitos fosfáticos. Empilhamento a seco. Granulometria. Análise granuloquímica. Desaguamento.

[1] Engenheiro de Produção e mestrando em Engenharia de Minas pelo CEFET-MG, com experiência em mineração e processos industriais.
[2] Doutora em Engenharia Metalúrgica e de Minas, vinculada ao CEFET-MG, com experiência em processos de flotação.
[3] Doutor em Geotecnia e pesquisador na área de geotecnia, vinculado ao CEFET-MG.
[4] Graduandas em Engenharia de Minas pelo CEFET-MG, com experiência em estudos de flotação.
[5] Mestre em Engenharia de Minas, vinculado à EuroChem, com experiência em processos minerais.
[6] Doutor em Engenharia de Materiais e pesquisador nas áreas de materiais poliméricos, compósitos e nanoestruturas, vinculado ao CEFET-MG.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

ABSTRACT
The growing need for safer and more sustainable approaches to mineral tailings disposal has encouraged alternatives to conventional tailings dams, such as dry stacking. This study aims to assess, in an integrated manner, the particle size distribution and granulochemical characteristics of phosphate tailings from three mineral processing streams: slimes, flotation tailings, and a global blend consisting of 20% slimes and 80% flotation tailings. The methodology comprised particle size characterization by wet sieving, fitting of particle size distributions using the Rosin–Rammler model, and chemical analysis by wavelength-dispersive X-ray fluorescence (WDXRF). The results revealed differences in particle size distribution and chemical composition among the streams. The slimes fraction was dominated by fine and ultrafine particles, potentially hindering drainage, whereas the flotation tailings showed particle size characteristics more favorable to fluid flow. The global blend exhibited a heterogeneous distribution in which interactions between fine and coarse particles may affect pore structure and permeability. Dewatering potential was assessed on an exploratory basis, without direct experimental validation of filtration performance indicators. It is concluded that integrating particle size distribution and granulochemical data provides a complementary approach to interpreting potential dewatering trends and supports future research on filtration and dry stacking.

KEYWORDS: *Phosphate tailings. Dry stacking. Particle size distribution. Granulochemical analysis. Dewatering.*

RESUMEN
La creciente necesidad de métodos más seguros y sostenibles para la disposición de relaves mineros ha impulsado alternativas a las presas convencionales, como el apilamiento en seco. Este estudio tiene como objetivo evaluar, de manera integrada, las características granulométricas y granuloquímicas de relaves fosfáticos procedentes de tres corrientes de procesamiento mineral: fracción lodosa, relaves de flotación y mezcla global, constituida por un 20% de lodos y un 80% de relaves de flotación. La metodología comprendió la caracterización granulométrica mediante tamizado en húmedo, el ajuste de las distribuciones utilizando el modelo de Rosin–Rammler y el análisis químico mediante fluorescencia de rayos X por dispersión de longitud de onda (WDXRF). Los resultados evidenciaron diferencias en la distribución granulométrica y en la composición química de las corrientes. La fracción lodosa presentó predominio de partículas finas y ultrafinas, potencialmente desfavorables para el drenaje, mientras que los relaves de flotación mostraron características granulométricas más favorables al flujo del agua. La mezcla global presentó una distribución heterogénea, cuya interacción entre partículas finas y gruesas puede influir en la estructura porosa y la permeabilidad. La evaluación del potencial de desaguado se realizó de manera exploratoria, sin validación experimental directa de los indicadores de filtración. Se concluye que la integración entre granulometría y granuloquímica constituye un enfoque complementario para interpretar tendencias potenciales de desaguado y contribuir a futuras investigaciones sobre filtración y apilamiento en seco.

PALABRAS CLAVE: *Relaves fosfáticos. Apilamiento en seco. Granulometría. Análisis granuloquímico. Desaguado.*

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

INTRODUÇÃO

A indústria mineral tem intensificado a adoção de práticas voltadas à redução de riscos operacionais e impactos ambientais associados à disposição de rejeitos. Nesse contexto, o empilhamento a seco tem se consolidado como uma alternativa aos métodos convencionais de disposição por reduzir o volume de água armazenado e aumentar a estabilidade dos depósitos (Cacciuttolo & Atencio, 2023; Davies *et al.*, 2011). Essa tendência está alinhada às diretrizes internacionais de gerenciamento de rejeitos, que recomendam abordagens integradas e baseadas em risco ao longo do ciclo de vida das operações minerárias (International Council on Mining and Metals [ICMM], 2021).

Entretanto, a viabilidade do empilhamento a seco depende diretamente da eficiência do desaguamento. A elevada proporção de partículas finas e ultrafinas reduz a permeabilidade dos rejeitos, dificulta a drenagem e compromete o desempenho da filtragem (Baltar, 2018; Olcay *et al.*, 2024; Hamraoui *et al.*, 2024). Em rejeitos fosfáticos, a interpretação dos possíveis mecanismos de desaguamento pode ser complementada pela análise integrada da granulometria e da composição química dos materiais. A distribuição dos teores de P_2O_5, SiO_2 e Fe_2O_3 entre as frações granulométricas permite identificar diferenças composicionais e formular hipóteses sobre possíveis associações minerais. Entretanto, essas informações não permitem determinar diretamente o grau de liberação mineral, a natureza das fases presentes ou sua influência específica sobre a retenção de água, sendo necessária caracterização mineralógica complementar (Gupta & Yan, 2006; Abouzeid, 2008; Li *et al.*, 2026).

A compreensão dessa interação é relevante não apenas para o desaguamento, mas também para iniciativas de valorização de rejeitos e recuperação de minerais de interesse econômico (Mdachi *et al.*, 2024). Contudo, embora a literatura reconheça a importância da granulometria e da composição química, essas variáveis são normalmente investigadas de forma independente. Permanecem limitadas as abordagens que integram informações granulométricas e granuloquímicas para interpretação do desempenho da filtragem e avaliação da aptidão ao empilhamento a seco (Hamraoui *et al.*, 2024; Otoo *et al.*, 2025).

A questão de pesquisa consiste em compreender como a distribuição granulométrica, associada à composição química por fração, contribui para interpretar as diferenças no potencial de desaguamento de rejeitos fosfáticos. A investigação justifica-se pela necessidade de avaliar, de modo integrado, correntes com distintos teores de partículas finas, em apoio à análise do empilhamento a seco. O objetivo geral deste trabalho é analisar o comportamento granulométrico

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

e granuloquímico da fração lamosa do *overflow* da deslamagem, do rejeito da flotação *scavenger* e do material global constituído por 20% de lama e 80% de rejeito da flotação.

Como objetivos específicos, busca-se caracterizar a distribuição de tamanhos das três correntes, ajustar as curvas pelo modelo de Rosin–Rammler, examinar os teores químicos por fração mediante fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda (WDXRF) e interpretar comparativamente as tendências estimadas de drenagem e filtração. A abordagem fornece subsídios exploratórios para a avaliação do empilhamento a seco, sem substituir ensaios diretos de filtração.

1. REFERENCIAL TEÓRICO

1.1. Granulometria e desempenho do desaguamento

A distribuição granulométrica influencia diretamente a permeabilidade, a conectividade dos poros e o comportamento hidráulico dos rejeitos minerais (Mitchell & Soga, 2005; Terzaghi *et al.*, 1996). Em geral, a redução do tamanho das partículas aumenta a resistência ao escoamento e reduz a permeabilidade, dificultando a drenagem e favorecendo a retenção de água (Wang *et al.*, 2014; Chang *et al.*, 2022; Xing *et al.*, 2026).

Esse efeito é mais pronunciado em materiais com elevada proporção de finos e ultrafinos, característica comum em rejeitos minerais provenientes de etapas avançadas de beneficiamento, resultando em menor eficiência de desaguamento (Das, 2014; Das & Sobhan, 2018; Dong *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2026). Como consequência, características granulométricas influenciam diretamente o desempenho da filtração, afetando parâmetros como taxa de filtração, tempo de ciclo e umidade residual (Wakeman & Tarleton, 2005; Wills & Finch, 2015; Fränkle *et al.*, 2022; Kaswalder *et al.*, 2018).

A distribuição de tamanhos é frequentemente representada pelo modelo de Rosin–Rammler, amplamente utilizado na caracterização de materiais particulados e em estudos de processamento mineral (Rosin & Rammler, 1933; Wills & Finch, 2015).

1.2. Granuloquímica e liberação mineral em rejeitos fosfáticos

A caracterização granuloquímica permite identificar a distribuição dos constituintes químicos entre diferentes classes granulométricas, fornecendo informações sobre a heterogeneidade composicional dos rejeitos minerais. Entretanto, a determinação dos teores químicos por fluorescência de raios X não permite identificar diretamente as fases mineralógicas nem quantificar o grau de liberação dos minerais, sendo necessária a utilização de técnicas

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

complementares de caracterização mineralógica. Em depósitos fosfáticos, a possível presença de apatita, silicatos e minerais portadores de ferro pode resultar em diferenças de composição entre as frações granulométricas, conforme discutido por Gupta e Yan (2006) e Abouzeid (2008).

Partículas poliminerálicas podem persistir mesmo após sucessivas etapas de cominuição, refletindo diferentes graus de liberação mineral (Fuerstenau & Han, 2003). Em rejeitos fosfáticos, aspectos granulométricos e mineralógicos atuam conjuntamente nos mecanismos de retenção de água (Li *et al.*, 2026). Além disso, a distribuição química dos constituintes ao longo das frações granulométricas é relevante para estratégias de recuperação e valorização de rejeitos (Mdachi *et al.*, 2024).

1.3. Integração entre granulometria e granuloquímica

A influência da distribuição granulométrica sobre a permeabilidade e os mecanismos de filtração é amplamente discutida na literatura (Wang *et al.*, 2014; Chang *et al.*, 2022; Xing *et al.*, 2026). De maneira complementar, a caracterização química por classe granulométrica permite identificar variações composicionais relevantes para o estudo de rejeitos minerais, embora não substitua análises específicas de identificação e liberação mineral (Gupta & Yan, 2006; Abouzeid, 2008; Li *et al.*, 2026). A integração dessas informações pode contribuir para uma interpretação mais abrangente das características físicas e químicas dos materiais, sem estabelecer, isoladamente, relações quantitativas de causa e efeito sobre seu desempenho durante o desaguamento.

Otoo *et al.* (2025) demonstraram que a interação entre partículas finas e grossas altera a estrutura do meio poroso, reduzindo a conectividade hidráulica e aumentando a retenção de água. De modo semelhante, Hamraoui *et al.* (2024) ressaltam a necessidade de abordagens integradas para compreender os mecanismos que controlam o desaguamento.

Dessa forma, a principal lacuna da literatura não está na compreensão individual da granulometria ou da granuloquímica, mas na limitada utilização conjunta dessas informações para interpretação e previsão do desempenho da filtragem. Essa lacuna fundamenta a presente pesquisa, que propõe a utilização integrada de dados granulométricos e granuloquímicos para interpretação do comportamento hidráulico e avaliação do potencial de desaguamento de rejeitos fosfáticos.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

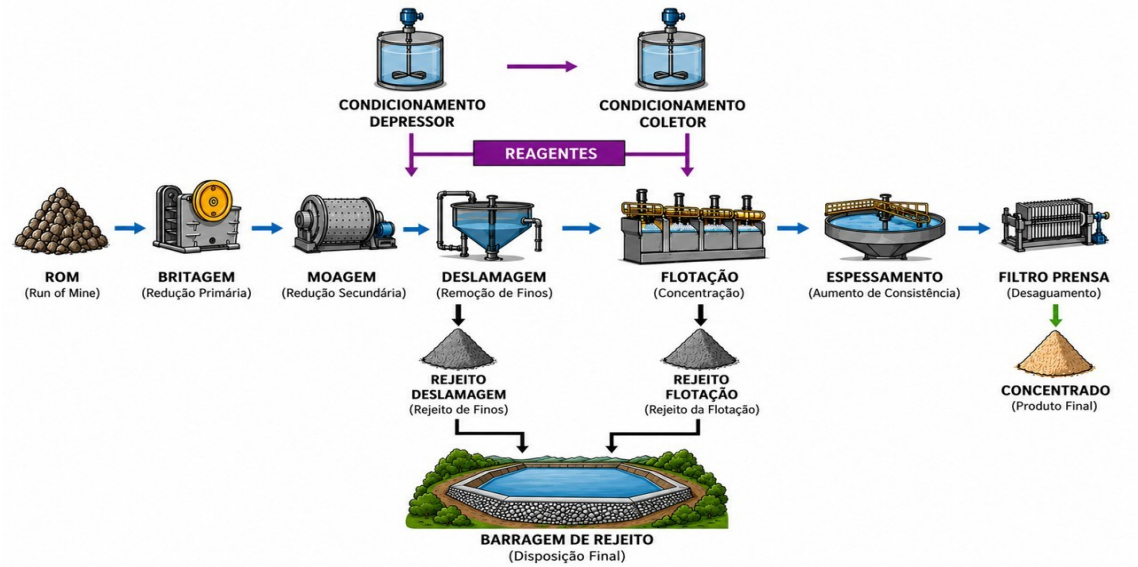
2. METODOLOGIA

2.1. Material

O material utilizado neste estudo consiste na combinação controlada de duas correntes provenientes do circuito industrial de beneficiamento de minério fosfático da unidade da EuroChem Fertilizantes Tocantins, localizada no Complexo Mineroquímico de Serra do Salitre (MG). As amostras avaliadas compreendem a fração lamosa proveniente do *overflow* do circuito de deslamagem, o rejeito da flotação aniônica (corrente *scavenger*) e o material global, preparado pela combinação controlada de 20% de fração lamosa e 80% de rejeito da flotação, em proporções mássicas de sólidos secos. Esse conjunto representa uma corrente típica de rejeito com elevada fração de partículas finas e ultrafinas, resultantes tanto da mineralogia natural quanto dos processos de cominuição.

Para melhor compreensão da origem das amostras avaliadas neste estudo, a Figura 1 apresenta o fluxograma simplificado do circuito industrial de beneficiamento fosfático, destacando as etapas de britagem, moagem, deslamagem, flotação, espessamento e filtragem, bem como os pontos de geração das correntes de rejeito utilizadas na pesquisa.

Figura 1. Fluxograma simplificado do circuito de beneficiamento fosfático da unidade industrial estudada, indicando as etapas de processamento, os pontos de adição de reagentes, as correntes de rejeito provenientes da deslamagem e da flotação e a disposição final dos rejeitos.



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

2.2. Preparação das amostras de rejeito fosfático

As amostras foram inicialmente secas em estufa a 105 ± 5 °C até massa constante, com o objetivo de remover a umidade residual. Após a secagem, o material foi homogeneizado e quarteado, sendo obtida uma alíquota representativa de aproximadamente 500 g para as análises granulométricas e químicas.

2.3. Caracterização das polpas de rejeito fosfático

2.3.1. Análise granulométrica

A distribuição granulométrica foi determinada por peneiramento a úmido, conforme ABNT NBR 7181 (ABNT, 2016) e ASTM D6913/D6913M (ASTM, 2017b), utilizando peneirador vibratório operando a aproximadamente 60 Hz e 280 rpm durante 15 minutos. A escolha do método a úmido justifica-se pela elevada proporção de partículas finas, que dificulta a separação eficiente por via seca. Foram utilizadas peneiras com aberturas de 2000 µm (#9), 1000 µm (#16), 710 µm (#24), 500 µm (#32), 212 µm (#65), 150 µm (#100), 75 µm (#200), 45 µm (#325), 38 µm (#400) e 25 µm (#500). A fração passante na peneira de 25 µm foi coletada no fundo do conjunto, e o percentual de partículas com tamanho inferior a 10 µm foi estimado a partir da curva granulométrica ajustada pelo modelo de Rosin–Rammler, não correspondendo a uma determinação direta por peneiramento.

A partir das curvas granulométricas acumuladas, foram determinados os diâmetros característicos D10, D30, D50, D60 e P80, bem como os coeficientes de uniformidade (Cu) e de curvatura (Cc), conforme os procedimentos descritos por Das (2014) e Mitchell e Soga (2005). Esses parâmetros foram utilizados para caracterizar e comparar a distribuição dos tamanhos de partículas das três correntes de rejeito fosfático estudadas.

A interpretação granulométrica foi realizada considerando a proporção de partículas finas e grossas e as características das distribuições acumuladas. O Sistema Unificado de Classificação dos Solos (USCS), conforme ASTM D2487 (ASTM, 2017a), foi utilizado como referência para uma avaliação preliminar das características granulométricas. Ressalta-se que a classificação geotécnica definitiva dos materiais depende de informações complementares, incluindo a determinação dos limites de consistência, quando aplicável.

As possíveis relações entre distribuição granulométrica, permeabilidade e resistência ao cisalhamento foram examinadas exclusivamente sob uma perspectiva teórica e exploratória, com base nos princípios descritos na literatura geotécnica. Não foram realizados ensaios específicos

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

para determinação experimental da condutividade hidráulica, dos parâmetros de resistência ao cisalhamento ou dos ângulos de atrito interno das correntes avaliadas. Consequentemente, não foram estabelecidos valores quantitativos dessas propriedades, sendo necessária a realização de ensaios geotécnicos complementares para sua determinação e validação.

2.3.2. Análise granuloquímica WDXRF

A composição química por fração granulométrica foi determinada por espectrometria de fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda (WDXRF), utilizando equipamento AXIOS FAST (Malvern Panalytical), com tubo de raios X de ânodo de ródio. As amostras foram previamente pulverizadas até granulometria inferior a 400 mesh e submetidas à fusão com fluxo à base de borato de lítio, conforme procedimentos padrão, garantindo a homogeneidade e a confiabilidade dos resultados analíticos.

2.4. Análise estatística e modelagem

2.4.1. Dados granulométricos e granuloquímicos

A análise dos dados foi conduzida por meio de uma abordagem quantitativa de caráter exploratório, considerando a ausência de replicatas experimentais por fração granulométrica. Foram utilizadas estatísticas descritivas, incluindo média, mediana, percentis (Q1 e Q3), desvio padrão e coeficiente de variação, para caracterização da distribuição dos parâmetros granulométricos e dos teores químicos. Adicionalmente, foram realizadas análises exploratórias, incluindo regressões e avaliação de tendências, com o objetivo de investigar a relação entre tamanho de partícula e composição química, permitindo identificar padrões de distribuição e possíveis comportamentos não lineares.

2.4.2. Modelagem granulométrica

A distribuição granulométrica das correntes de rejeito fosfático foi ajustada pelo modelo de Rosin–Rammler, utilizado para representar a distribuição acumulada dos tamanhos de partículas. O modelo permite descrever matematicamente a proporção de material passante em função do tamanho das partículas, conforme apresentado na Equação (1).

$$P(x) = 100(1 - e^{-(x/d)^n}) \quad \text{eq. [1]}$$

Em que:

P(x) = percentual passante acumulado (%);

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

x = tamanho da partícula (μm);

d = parâmetro de escala da distribuição (μm), correspondente ao tamanho de partícula para o qual o percentual passante acumulado é aproximadamente 63,2%;

n = parâmetro de forma da distribuição (adimensional), relacionado à dispersão dos tamanhos das partículas.

Os parâmetros de escala (d) e de forma (n) foram estimados por regressão não linear, a partir dos dados granulométricos das correntes estudadas. A qualidade dos ajustes foi avaliada por meio do coeficiente de determinação (R^2) e da raiz do erro quadrático médio (RMSE). Valores mais elevados de R^2 e menores valores de RMSE indicam melhor concordância entre os resultados experimentais e os valores estimados pelo modelo, dentro das limitações de sua aplicação. A modelagem foi utilizada exclusivamente para caracterização e interpretação das distribuições granulométricas, não constituindo um modelo preditivo validado de desempenho de filtração.

2.4.3. Parâmetros operacionais de filtração

A avaliação do potencial de desaguamento das correntes de rejeito fosfático foi realizada por meio de uma abordagem qualitativa, exploratória e comparativa, fundamentada na integração das características granulométricas e granuloquímicas. Foram analisadas três correntes: fração lamosa, rejeito da flotação e material global constituído por 20% de lama e 80% de rejeito da flotação, em proporções mássicas de sólidos secos. A interpretação considerou a distribuição de tamanhos das partículas, a proporção de finos e grossos e a composição química por classe granulométrica.

A análise foi fundamentada nos princípios de escoamento em meios porosos e filtração, considerando a possibilidade de que partículas finas modifiquem a organização dos espaços vazios e a conectividade hidráulica dos materiais (Tiller & Tsai, 1986; Wakeman & Tarleton, 2005). As informações granuloquímicas foram utilizadas como elementos complementares, sem estabelecer relações causais diretas entre composição química e desempenho operacional.

As Figuras 8 e 9 apresentam representações conceituais das possíveis tendências de desaguamento das correntes estudadas. Ressalta-se que não foram realizados ensaios experimentais diretos de filtração nem desenvolvido modelo quantitativo calibrado e validado. Portanto, não foram determinados valores experimentais de taxa unitária de filtração (TUF), tempo de ciclo ou umidade residual. As interpretações possuem caráter exclusivamente

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

exploratório, não podendo ser utilizadas para dimensionamento industrial ou comprovação da viabilidade do empilhamento a seco.

A confirmação das hipóteses apresentadas requer ensaios experimentais de filtração, preferencialmente com replicatas e condições operacionais controladas, permitindo avaliar quantitativamente as relações entre granulometria, composição química e desempenho do desaguamento.

2.4.4. Ferramentas computacionais

As análises estatísticas e o tratamento dos dados granulométricos e granuloquímicos foram realizados com o auxílio do *software* Minitab® Statistical *Software*, versão 22.4. As regressões não lineares associadas ao ajuste do modelo de Rosin–Rammler, bem como os cálculos dos parâmetros estatísticos descritivos (média, mediana e quartis), foram conduzidos com o suporte dessa ferramenta. A utilização de ferramentas computacionais permitiu integrar os dados granulométricos e químicos e realizar análises quantitativas exploratórias de forma consistente, especialmente considerando a ausência de replicatas experimentais. Essa abordagem está alinhada com práticas reconhecidas em processamento mineral e caracterização de sistemas particulados, nas quais a modelagem e a análise estatística são utilizadas como suporte à interpretação físico-química dos dados (Wills & Finch, 2015; Wills & Napier-Munn, 2006).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

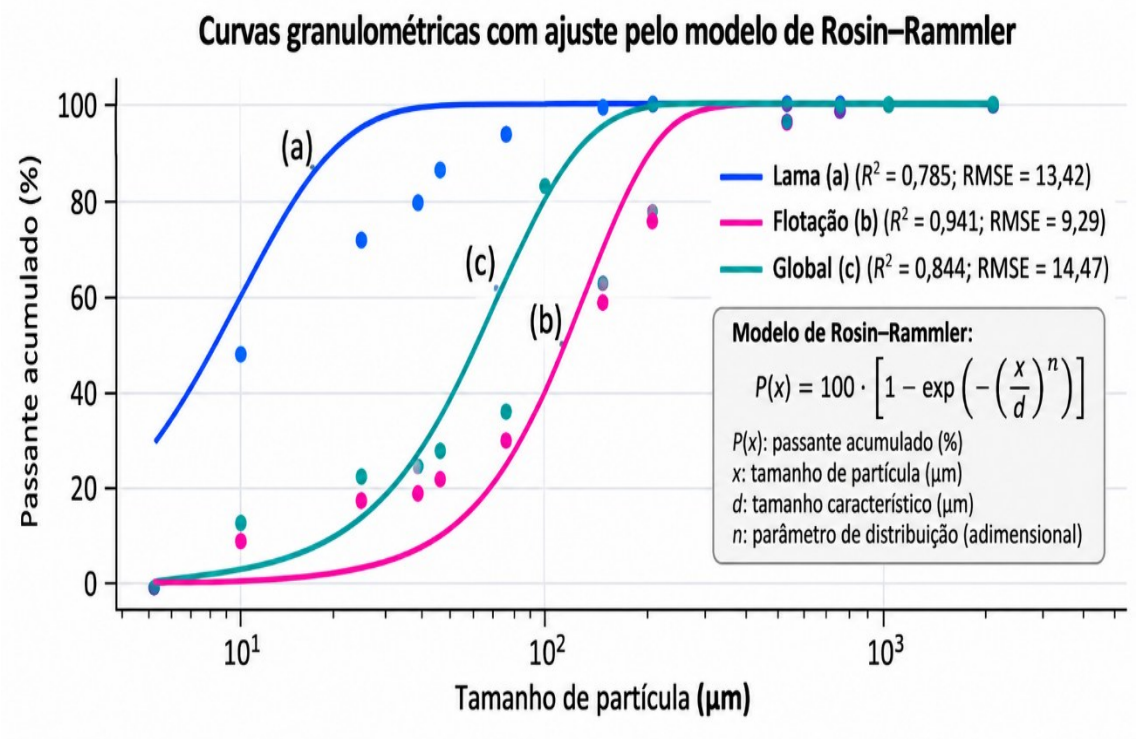
3.1. Análises granulométricas

A Figura 2 apresenta as curvas granulométricas da fração lamosa proveniente do *overflow* da deslamagem (a), do rejeito da flotação *scavenger* (b) e do material global (c). As distribuições granulométricas apresentam comportamentos distintos, refletindo diretamente as diferenças operacionais entre as correntes e evidenciando os efeitos combinados de cominuição, classificação hidráulica e concentração mineral.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 2. Curva granulométrica ajustada pelo modelo de Rosin–Rammler para amostras de (a) fração lamosa proveniente do *overflow* da deslamagem, (b) rejeito da flotação *scavenger* e (c) do material global



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa (2026).
Nota: R² corresponde ao coeficiente de determinação, utilizado para avaliar a qualidade do ajuste do modelo aos dados granulométricos experimentais; RMSE representa a raiz do erro quadrático médio entre os valores observados e estimados; d corresponde ao parâmetro de escala da distribuição granulométrica, associado ao tamanho de partícula para o qual o percentual passante acumulado é aproximadamente 63,2%; n representa o parâmetro de forma da distribuição, relacionado à dispersão dos tamanhos das partículas. Os parâmetros foram obtidos por ajuste do modelo de Rosin–Rammler aos dados granulométricos das correntes estudadas.

A caracterização granulométrica evidenciou diferenças relevantes entre as três correntes de rejeito fosfático, tanto na distribuição dos tamanhos das partículas quanto na qualidade dos ajustes pelo modelo de Rosin–Rammler. A fração lamosa, proveniente do *overflow* da deslamagem (Figura 2a), apresentou predominância de partículas finas e ultrafinas, com aproximadamente 48% da massa abaixo de 10 µm, valor estimado pelo ajuste granulométrico, e cerca de 72% abaixo de 25 µm. O diâmetro mediano (D50) situa-se próximo de 10 µm, enquanto o P80 varia entre 38 e 40 µm. Os coeficientes de uniformidade (Cu ≈ 3–4) e de curvatura (Cc ≈

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

1–2) complementam a caracterização dessa distribuição, evidenciando a predominância das frações finas e a reduzida participação de partículas acima de 150 µm.

A predominância de partículas finas e ultrafinas na fração lamosa sugere maior área superficial específica e possível redução da conectividade dos poros, características que podem dificultar o escoamento da água e favorecer sua retenção (Mitchell & Soga, 2005). Entretanto, a condutividade hidráulica não foi determinada experimentalmente neste estudo. Dessa forma, não é possível estabelecer valores quantitativos de permeabilidade para essa corrente. Ressalta-se, ainda, que a aplicação da equação empírica de Hazen (1911) apresenta limitações para materiais com elevada proporção de partículas finas, sendo necessária a realização de ensaios específicos para avaliar seu comportamento hidráulico.

O ajuste pelo modelo de Rosin–Rammler para a fração lamosa apresentou menor qualidade ($R^2 \approx 0,78$; RMSE ≈ 13,4), indicando que a distribuição granulométrica dessa corrente não foi representada com a mesma precisão observada para o rejeito da flotação. Esse resultado pode estar associado à complexidade da distribuição dos tamanhos de partículas, especialmente à elevada participação de frações finas e ultrafinas. Entretanto, a qualidade do ajuste, isoladamente, não permite comprovar a existência de múltiplas populações granulométricas. Considerando o caráter exploratório do estudo, os parâmetros obtidos foram utilizados para a caracterização comparativa das correntes, sem estabelecer relações quantitativas diretas com o desempenho da filtração.

Em contraste, o rejeito da flotação (Figura 2b) apresenta distribuição granulométrica mais grossa, com predominância de partículas acima de 75 µm (aproximadamente 70%) e participação estimada de cerca de 9% de partículas inferiores a 10 µm. Os parâmetros D50 ≈ 126 µm e P80 entre 260 e 300 µm, associados aos coeficientes Cu ≈ 3–4 e Cc ≈ 0,8–1,2, evidenciam características predominantemente granulares. A maior participação de partículas grossas pode favorecer a formação de uma estrutura porosa com maior conectividade hidráulica, conforme os princípios discutidos por Mitchell e Soga (2005). O ajuste pelo modelo de Rosin–Rammler apresentou $R^2 \approx 0,94$ e RMSE ≈ 9,3, indicando concordância entre os dados granulométricos e a distribuição modelada. Essas características sugerem condições potencialmente favoráveis à drenagem, mas não permitem comprovar maior eficiência de filtração ou menor umidade residual sem ensaios experimentais específicos.

O material global (Figura 2c), constituído por 20% de fração lamosa e 80% de rejeito da flotação, apresentou distribuição granulométrica heterogênea, com aproximadamente 13% de partículas inferiores a 10 µm (estimativa obtida pelo modelo granulométrico), 23% inferiores a 25

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

µm e 52% superiores a 75 µm. Os coeficientes de uniformidade (Cu ≈ 10–15) e de curvatura (Cc ≈ 2–3) indicam maior amplitude granulométrica em comparação às correntes individuais. O ajuste pelo modelo de Rosin–Rammler apresentou $R^2 \approx 0,84$ e RMSE ≈ 14,5, evidenciando limitações na representação da distribuição. A coexistência de partículas finas e grossas sugere possíveis interações na organização do meio poroso, incluindo o preenchimento parcial dos vazios por partículas menores. Entretanto, esses mecanismos não foram verificados experimentalmente, de modo que sua possível influência sobre a permeabilidade e o desaguamento deve ser interpretada exclusivamente como hipótese exploratória.

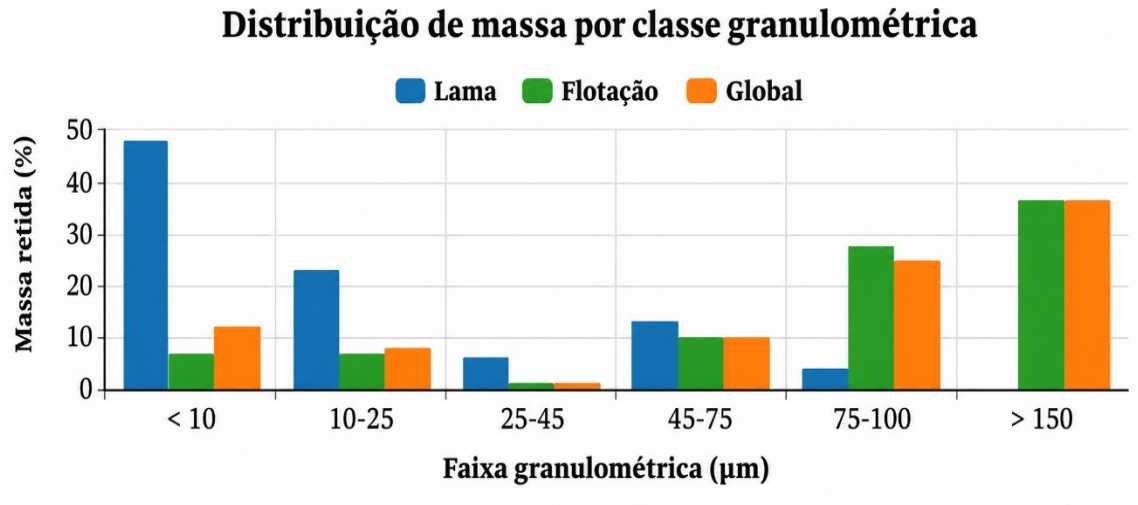
As diferenças granulométricas observadas entre as correntes de rejeito fosfático podem influenciar suas propriedades geotécnicas, especialmente a resistência ao cisalhamento e o comportamento durante a compactação. A predominância de partículas mais grossas no rejeito da flotação sugere maior possibilidade de intertravamento entre os grãos, enquanto a elevada proporção de partículas finas na fração lamosa pode modificar os mecanismos de resistência e deformabilidade do material. Entretanto, essas relações dependem também de fatores como mineralogia, distribuição granulométrica, índice de vazios, estado de compactação e condições de saturação (Terzaghi *et al.*, 1996). Considerando que não foram realizados ensaios experimentais específicos de resistência ao cisalhamento, não é possível determinar quantitativamente os ângulos de atrito interno das correntes analisadas nem estabelecer conclusões definitivas sobre sua estabilidade geotécnica. A avaliação dessas propriedades requer ensaios apropriados, como cisalhamento direto ou compressão triaxial, em condições representativas de disposição dos rejeitos.

A distribuição de massa por classes granulométricas agrupadas (Figura 3) evidencia diferenças marcantes na forma das distribuições entre as correntes. A fração lamosa apresenta forte concentração nas classes ultrafinas (<10 µm e 10–25 µm), indicando predominância de partículas finas. O rejeito da flotação apresenta maior contribuição nas classes intermediárias e grossas, com destaque para a faixa de 75–150 µm, refletindo um comportamento mais granular. O material global apresenta distribuição mais espalhada entre as classes granulométricas, evidenciando a superposição das populações fina e grossa e caracterizando a heterogeneidade resultante da mistura.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 3. Distribuição de massa por classes granulométricas agrupadas (<10 µm, 10–25 µm, 25–45 µm, 45–75 µm, 75–150 µm e >150 µm) para as amostras de fração lamosa, rejeito de flotação e material global



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa (2026).

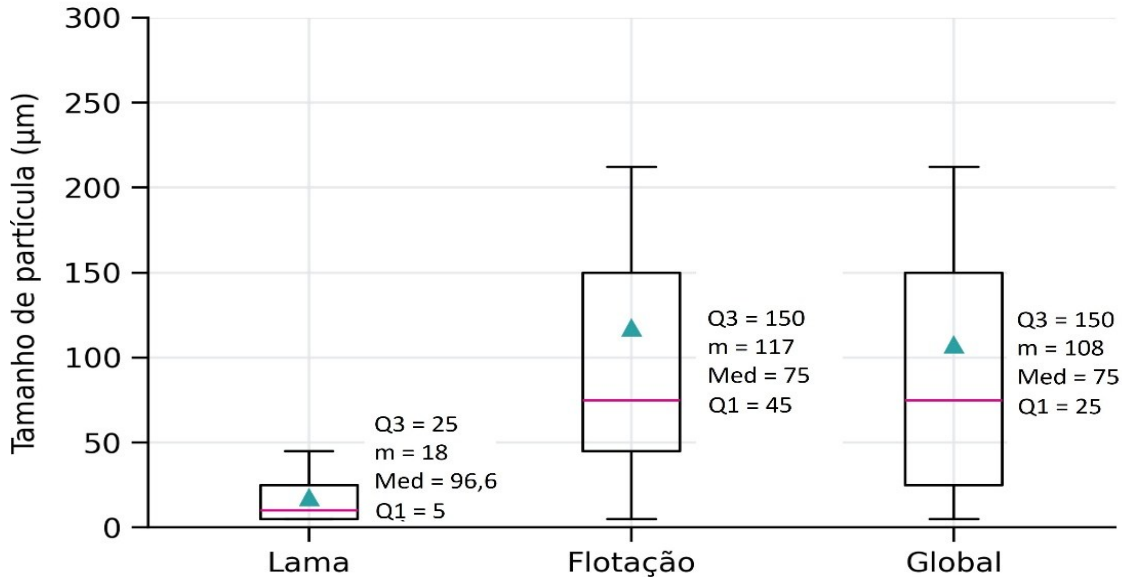
A amplitude da distribuição granulométrica foi avaliada pelo coeficiente de uniformidade (Cu = D60/D10), no qual valores mais elevados indicam maior amplitude de tamanhos de partículas (Das & Sobhan, 2018; Terzaghi *et al.*, 1996). A fração lamosa e o rejeito da flotação apresentaram coeficientes de mesma ordem de grandeza, embora com diferentes concentrações de partículas entre as classes granulométricas. O material global apresentou valores superiores de Cu, compatíveis com sua distribuição mais ampla e heterogênea, resultante da combinação entre frações finas e grossas. Esses resultados evidenciam a importância de considerar tanto a amplitude quanto a forma da distribuição granulométrica na caracterização comparativa dos rejeitos (Allen, 2013; Wills & Napier-Munn, 2006).

A Figura 4 apresenta o *boxplot* granulométrico das correntes analisadas, permitindo comparar a posição central e a dispersão dos tamanhos de partículas a partir de uma distribuição ponderada por classe. A análise dos quartis (Q1 e Q3), da mediana e da média complementa as interpretações das Figuras 2 e 3.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 4. *Boxplot* granulométrico das amostras de fração lamosa, rejeito da flotação e material global, construído a partir da distribuição granulométrica ponderada por classe



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa (2026).
Nota: As caixas representam o intervalo interquartil (Q1–Q3), a linha central indica a mediana e o marcador triangular representa a média. O eixo vertical corresponde ao tamanho de partícula (µm) e foi limitado a 300 µm para melhor visualização das regiões de maior concentração de dados, com exclusão da representação gráfica dos valores extremos.

A análise do boxplot granulométrico (Figura 4) evidenciou diferenças na posição central e na dispersão dos tamanhos de partículas das três correntes. A fração lamosa apresentou maior concentração nas classes finas, com primeiro quartil (Q1) entre 5 e 10 µm, mediana próxima de 10 µm e terceiro quartil (Q3) aproximadamente igual a 25 µm. O rejeito da flotação apresentou distribuição deslocada para classes mais grossas, com Q1 entre 25 e 45 µm, mediana próxima de 75 µm e Q3 entre 100 e 150 µm. O material global apresentou maior dispersão interquartil, com mediana situada aproximadamente entre 45 e 75 µm, refletindo a coexistência de partículas finas e grossas. As diferenças entre médias e medianas sugerem assimetrias nas distribuições, especialmente na fração lamosa e no material global.

Esses resultados demonstram a heterogeneidade granulométrica das correntes e fornecem subsídios para a interpretação exploratória de possíveis diferenças no comportamento durante o desaguamento. A predominância de partículas finas na fração lamosa pode favorecer a retenção de água, enquanto a maior participação de partículas grossas no rejeito da flotação sugere condições potencialmente favoráveis à drenagem (Mitchell & Soga, 2005; Tiller & Tsai, 1986). Entretanto, essas relações não foram validadas por ensaios experimentais de filtração e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

não permitem determinar quantitativamente permeabilidade, taxa unitária de filtração, tempo de ciclo ou umidade residual. Ressalta-se que os parâmetros estatísticos apresentados foram estimados a partir de distribuições granulométricas ponderadas por classe, constituindo aproximações da distribuição contínua (Allen, 2013; Wills & Napier-Munn, 2006).

3.2. Análise granuloquímica

As Figuras 5, 6 e 7 apresentam a distribuição dos principais óxidos químicos nas diferentes frações granulométricas das correntes de rejeito fosfático estudadas. A análise granuloquímica permite identificar variações na composição química em função do tamanho das partículas, fornecendo informações complementares à caracterização granulométrica. Essas diferenças podem estar associadas à heterogeneidade dos materiais e aos processos de fragmentação e concentração mineral (Wills & Finch, 2015). Entretanto, os resultados da fluorescência de raios X por dispersão de comprimento de onda (WDXRF) não permitem determinar diretamente as fases mineralógicas presentes nem o grau de liberação dos minerais.

Figura 5. Análise granuloquímica da fração lamosa proveniente do overflow da deslamagem

Overflow Deslamagem							Distribuição dos óxidos por fração granulométrica									
Mesh (#)	Malha (µm)	Massa (g)	Retido simples (%)	Retido acum. (%)	Passante acum. (%)	Dist. P_2O_5 (%)	P_2O_5	Fe_2O_3	MgO	CaO	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	MnO	K_2O	RCP
9	2000		0,0%	0,0%	100,00	0,0%										
16	1000		0,0%	0,0%	100,00	0,0%										
24	710		0,0%	0,0%	100,00	0,0%										
32	500		0,0%	0,0%	100,00	0,0%										
65	212		0,0%	0,0%	100,00	0,0%										
100	150	3,2	0,6%	0,6%	99,37	0,3%	1,72	16,79	15,32	6,1	8,74	36,78	3,84	0,29	2,01	3,55
200	75	27,8	5,6%	6,2%	93,81	4,6%	2,68	17,12	15,24	7,02	8,44	37,57	3,06	0,28	1,86	2,62
325	45	37,3	7,5%	13,7%	86,34	8,4%	3,7	17,42	10,79	11,45	6,48	38,31	4,87	0,27	1,97	3,09
400	38	33,9	6,8%	20,4%	79,56	7,7%	3,7	17	10,79	11,45	6,48	38,31	4,87	0,27	1,97	3,09
500	25	37,9	7,6%	28,0%	71,99	11,1%	4,79	15,73	7,98	12,37	5,52	33,88	5,08	0,27	1,42	2,58
	10	119,1	23,8%	51,8%	48,16	35,4%	4,86	15,63	6,31	12,55	4,68	36,29	6,14	0,26	1,9	2,58
	<10	240,8	48,2%	100,0%	0,00	32,5%	2,21	22,37	6,16	4,92	8,4	35,17	4,46	0,28	1,3	2,23
Total		499,92	100,0%	-		100,0%	3,27	19,23	7,56	8,36	7,03	35,93	4,88	0,27	1,58	2,55
Análise Global							3,17	24,16	8,48	9,35	6,27	34,97	6,15	0,28	1,43	2,95

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa (2026).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Figura 6. Análise granuloquímica do rejeito da flotação

Rejeito Flotação							Distribuição dos óxidos por fração granulométrica									
Mesh (#)	Malha (µm)	Massa (g)	Retido simples (%)	Retido acumul. (%)	Passante acumul. (%)	Dist. P_2O_5 (%)	P_2O_5	Fe_2O_3	MgO	CaO	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	MnO	K_2O	RCP
9	2000		0,0%	0,0%	100,00	0,0%										
16	1000		0,0%	0,0%	100,00	0,0%										
24	710	4,7	0,9%	0,9%	99,10	0,6%	1,57	19,26	6,29	9,64	7,22	39,31	8,46	0,25	3,35	6,14
32	500	15,1	2,9%	3,8%	96,20	2,6%	2,05	24,56	7,09	13,26	5,49	31,61	10,99	0,26	2,44	6,47
65	212	106,5	20,4%	24,3%	75,75	21,0%	2,31	28,65	7,43	15,61	4,19	28,45	11,73	0,26	1,74	6,76
100	150	87,4	16,8%	41,0%	58,97	16,5%	2,22	29,62	7,9	16,01	3,86	28,62	11,06	0,26	1,51	7,21
200	75	148,9	28,6%	69,6%	30,38	25,1%	1,98	27,68	8,07	15,98	3,81	30,45	10,88	0,24	1,48	8,07
325	45	42,3	8,1%	77,7%	22,25	5,4%	1,49	24,25	8,68	13,91	4,57	33,47	9,89	0,24	1,68	9,34
400	38	15,5	3,0%	80,7%	19,28	1,9%	1,4	35	6,07	15,66	2,96	27,22	12,85	0,27	1,17	11,19
500	25	7,9	1,5%	82,2%	17,76	0,9%	1,28	32,03	6,2	15,17	3,24	29,42	12,56	0,27	1,29	11,85
	10	43,9	8,4%	90,7%	9,32	17,5%	4,68	15,42	6,19	14,43	4	36,44	7,09	0,22	1,92	
	<10	48,6	9,3%	100,0%	0,00	8,4%	2,04	19,21	7,35	7,38	6,71	36,74	5,41	0,26	1,78	3,62
Total		520,8	100,0%	-		100,0%	2,25	26,22	7,60	14,65	4,29	31,07	10,24	0,25	1,65	6,51
Análise Global							2,04	28,35	7,69	14,82	4,29	30,62	11,02	0,26	1,64	7,26

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa (2026).

Figura 7. Análise granuloquímica do material global (20% de lama e 80% de rejeito da flotação)

Rejeito Global							Distribuição dos óxidos por fração granulométrica									
Mesh (#)	Malha (µm)	Massa (g)	Retido simples (%)	Retido acumul. (%)	Passante acumul. (%)	Dist. P_2O_5 (%)	P_2O_5	Fe_2O_3	MgO	CaO	Al_2O_3	SiO_2	TiO_2	MnO	K_2O	RCP
9	2000	0	0,0%	0,0%	100,00	0,0%										
16	1000	0	0,0%	0,0%	100,00	0,0%										
24	710	4,23	0,8%	0,8%	99,18	0,5%	1,57	19,26	6,29	9,64	7,22	39,31	8,46	0,25	3,35	6,14
32	500	13,59	2,6%	3,4%	96,56	2,1%	2,05	24,56	7,09	13,26	5,49	31,61	10,99	0,26	2,44	6,47
65	212	95,9	18,5%	21,9%	78,09	16,8%	2,31	28,65	7,43	15,61	4,19	28,45	11,73	0,26	1,74	6,76
100	150	79,0	15,2%	37,1%	62,86	13,2%	2,20	29,17	8,16	15,66	4,03	28,91	10,81	0,26	1,53	7,08
200	75	136,8	26,4%	63,5%	36,49	21,8%	2,09	26,02	9,20	14,57	4,54	31,57	9,65	0,25	1,54	7,21
325	45	41,8	8,1%	71,6%	28,43	8,0%	2,53	21,05	9,67	12,76	5,47	35,74	7,54	0,25	1,82	6,41
400	38	17,3	3,3%	74,9%	25,09	3,9%	2,98	22,91	9,31	12,77	5,38	34,83	7,37	0,27	1,72	5,63
500	25	10,9	2,1%	77,0%	22,99	3,5%	4,18	18,54	7,67	12,85	5,13	33,11	6,37	0,27	1,40	4,18
	10	51,5	9,9%	86,9%	13,07	18,8%	4,81	15,57	6,28	13,06	4,50	36,33	6,40	0,25	1,91	1,89
	<10	67,8	13,1%	100,0%	0,00	11,3%	2,18	21,84	6,36	5,33	8,12	35,43	4,62	0,28	1,38	2,46
Total		518,712	100,0%	-		100,0%	2,53	24,65	7,98	13,25	5,02	32,11	8,94	0,26	1,65	5,75
Análise Global							2,75	22,79	7,58	11,57	5,63	33,45	7,62	0,26	1,62	4,57

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa (2026).

Na fração lamosa (Figura 5), observou-se enriquecimento relativo de P_2O_5 em determinadas classes finas, especialmente entre 10 e 25 µm, além de teores de SiO_2 de aproximadamente 35–38% e Fe_2O_3 entre 15 e 22% nas frações analisadas. Essas diferenças evidenciam heterogeneidade composicional, mas a presença simultânea dos óxidos não

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

comprova associações mineralógicas específicas, ocorrência de partículas poliminerálicas ou liberação incompleta da apatita (Gupta & Yan, 2006; Abouzeid, 2008).

O rejeito da flotação (Figura 6) apresentou menor teor relativo de P_2O_5 em comparação à fração lamosa, além de variações nas concentrações de Fe_2O_3, CaO e SiO_2 entre as classes granulométricas. Esses resultados caracterizam a heterogeneidade química da corrente, mas não permitem determinar a eficiência de recuperação da flotação, que depende de informações complementares sobre massas e teores das correntes do processo. Tampouco comprovam mecanismos de fragmentação seletiva ou o grau de liberação mineral (Fuerstenau & Han, 2003; Guldris León *et al.*, 2020).

O material global (Figura 7), composto por 20% de fração lamosa e 80% de rejeito da flotação, apresentou variações nos teores de P_2O_5, SiO_2, Fe_2O_3 e outros constituintes entre as classes granulométricas, refletindo a combinação de materiais com características distintas. Em conjunto, as análises demonstram diferenças composicionais entre as três correntes. Entretanto, a técnica WDXRF não permite identificar diretamente as fases mineralógicas ou quantificar o grau de liberação, sendo necessária caracterização complementar, por exemplo, por microscopia eletrônica associada à microanálise química ou análise mineralógica automatizada.

3.3. Discussão integrada: granulometria e granuloquímica

A integração dos resultados granulométricos e granuloquímicos evidenciou diferenças entre as três correntes de rejeito fosfático, permitindo interpretar conjuntamente suas características físicas e químicas. O modelo de Rosin–Rammler possibilitou representar as distribuições de tamanho das partículas, com diferentes níveis de qualidade de ajuste, enquanto a análise química por fração granulométrica revelou variações composicionais entre as correntes (Rosin & Rammler, 1933; Wills & Finch, 2015). Essas informações oferecem subsídios para a formulação de hipóteses sobre o desaguamento, sem constituírem determinações experimentais do comportamento hidráulico.

A fração lamosa apresentou predominância de partículas finas e ultrafinas, potencialmente associadas à maior retenção de água e à menor conectividade dos poros. O rejeito da flotação, por sua vez, apresentou distribuição granulométrica mais grossa, teoricamente favorável à formação de caminhos de drenagem. As diferenças nos teores de P_2O_5, SiO_2 e Fe_2O_3 evidenciam heterogeneidade composicional, mas não permitem determinar diretamente as fases mineralógicas, o grau de liberação dos minerais ou a eficiência da flotação. Tais interpretações exigem caracterização mineralógica e informações complementares do

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

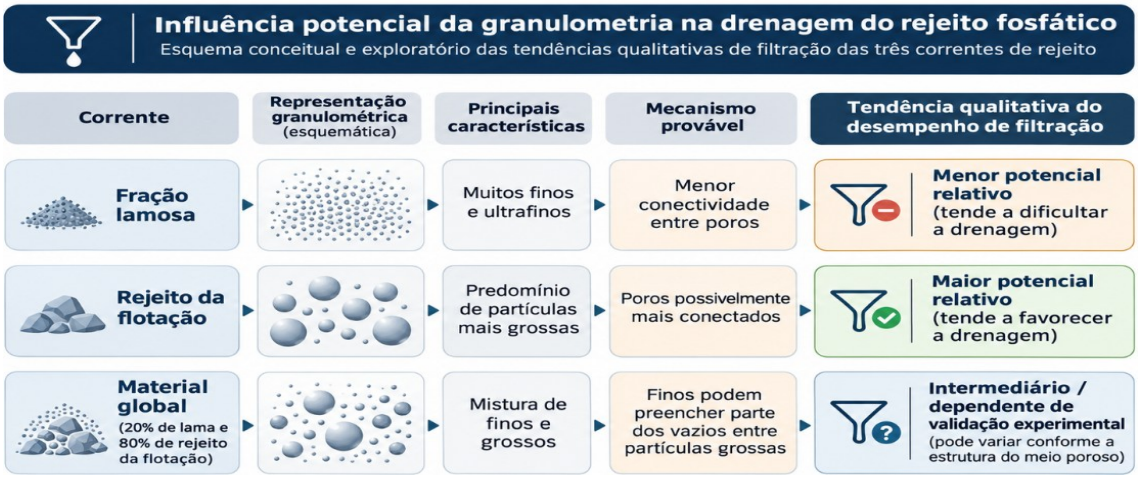
processo (Gupta & Yan, 2006; Abouzeid, 2008; Fuerstenau & Han, 2003; Guldris León *et al.*, 2020).

O material global, composto por 20% de fração lamosa e 80% de rejeito da flotação, apresentou distribuição granulométrica heterogênea, cuja interação entre partículas finas e grossas pode modificar a organização dos espaços vazios e influenciar os mecanismos de drenagem (Otoo *et al.*, 2025). Entretanto, essas possibilidades não foram confirmadas por ensaios específicos de permeabilidade ou filtração. Assim, a principal contribuição do estudo consiste na caracterização integrada das correntes e na identificação de tendências qualitativas que poderão orientar futuras investigações experimentais sobre desaguamento e empilhamento a seco, sem estabelecer previsões quantitativas de desempenho operacional.

3.4. Implicações das análises granulométricas e granuloquímicas na filtração

A integração das características granulométricas e granuloquímicas das três correntes de rejeito fosfático permite formular hipóteses qualitativas sobre seus possíveis comportamentos durante o desaguamento. A Figura 8 apresenta uma representação conceitual dessas tendências, considerando a influência potencial da distribuição de partículas finas e grossas sobre a organização do meio poroso e os mecanismos de drenagem. Ressalta-se que as interpretações possuem caráter exploratório, não correspondendo a medições experimentais de taxa unitária de filtração (TUF) ou a previsões quantitativas validadas.

Figura 8. Representação ilustrativa das tendências qualitativas do desempenho de filtração das correntes de rejeito fosfático: fração lamosa, rejeito da flotação e material global (20% de lama e 80% de rejeito da flotação).



Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa (2026).

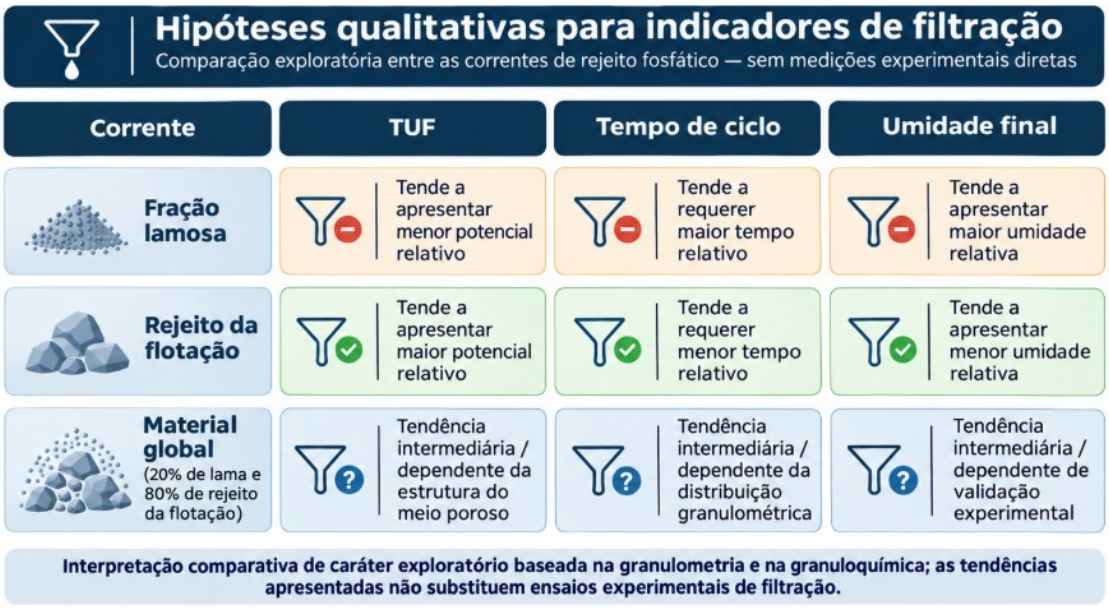
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Nota: Representação gráfica de caráter exclusivamente ilustrativo, fundamentada na interpretação integrada das características granulométricas e granuloquímicas dos materiais. As tendências apresentadas constituem hipóteses qualitativas e não correspondem a medições experimentais de taxa unitária de filtração (TUF), nem a resultados obtidos por modelo quantitativo calibrado e validado. Portanto, não devem ser utilizadas para dimensionamento de equipamentos, previsão de desempenho operacional ou determinação da viabilidade do empilhamento a seco.

As características granulométricas das correntes estudadas permitem formular hipóteses sobre seus possíveis comportamentos durante o desaguamento. A predominância de partículas finas e ultrafinas na fração lamosa pode favorecer a retenção de água, enquanto a maior participação de partículas grossas no rejeito da flotação sugere condições teoricamente mais favoráveis à drenagem (Tiller & Tsai, 1986; Wakeman & Tarleton, 2005). No material global, a interação entre partículas finas e grossas pode modificar a organização dos espaços vazios e a conectividade do meio poroso (Otoo *et al.*, 2025). A Figura 9 sintetiza essas hipóteses em relação à taxa unitária de filtração (TUF), ao tempo de ciclo e à umidade final. Ressalta-se que tais tendências possuem caráter exclusivamente conceitual, não representam resultados experimentais nem previsões quantitativas validadas e dependem de ensaios específicos de filtração para sua confirmação.

Figura 9. Representação ilustrativa das tendências qualitativas esperadas para a taxa unitária de filtração (TUF), o tempo de ciclo e a umidade final das correntes de rejeito fosfático, considerando a fração lamosa, o rejeito da flotação e o material global (20% de lama e 80% de rejeito da flotação)



Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Fonte: Elaborado pelos autores com base nos dados da pesquisa (2026).
Nota: As tendências comparativas apresentadas possuem caráter conceitual e exploratório, sendo fundamentadas nas características granulométricas e granuloquímicas das correntes estudadas e nos mecanismos de escoamento em meios porosos descritos na literatura. As classificações relativas não representam valores experimentais de TUF, tempo de ciclo ou umidade residual, tampouco previsões obtidas por modelo matemático validado. A confirmação das hipóteses requer ensaios específicos e replicados de filtração, não sendo apropriada sua utilização para dimensionamento industrial ou previsão operacional.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados deste estudo evidenciaram diferenças relevantes nas características granulométricas e granuloquímicas das três correntes de rejeito fosfático analisadas. A fração lamosa, com diâmetro mediano próximo de 9 μm e predominância de partículas finas e ultrafinas, apresentou características potencialmente associadas à maior retenção de água. O rejeito da flotação, com diâmetro mediano aproximado de 126 μm e maior participação de partículas grossas, apresentou distribuição granulométrica teoricamente mais favorável à drenagem. O material global, constituído por 20% de lama e 80% de rejeito da flotação, demonstrou maior heterogeneidade granulométrica, cuja influência sobre a estrutura porosa depende da interação entre as diferentes classes de partículas.

A caracterização granuloquímica identificou variações nos teores de P_2O_5, SiO_2 e Fe_2O_3 entre as frações granulométricas, evidenciando diferenças composicionais entre as correntes estudadas. Entretanto, os resultados obtidos por WDXRF não permitem determinar diretamente as fases mineralógicas, o grau de liberação dos minerais ou sua influência específica sobre os mecanismos de retenção de água. Da mesma forma, as tendências qualitativas apresentadas nas Figuras 8 e 9 não constituem comprovação experimental do desempenho de filtração, uma vez que não foram realizados ensaios diretos nem desenvolvido modelo quantitativo calibrado e validado.

Conclui-se que a integração entre granulometria e granuloquímica constitui uma abordagem complementar para a caracterização de rejeitos fosfáticos e a formulação de hipóteses sobre seu potencial de desaguamento. A principal contribuição científica consiste na análise comparativa das três correntes e na identificação de características físicas e químicas relevantes para futuras investigações. A determinação quantitativa da taxa unitária de filtração (TUF), do tempo de ciclo, da umidade residual e da viabilidade técnica do empilhamento a seco requer validação experimental, caracterização geotécnica e avaliação das condições operacionais específicas.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

LIMITAÇÕES DO ESTUDO E PERSPECTIVAS FUTURAS

A interpretação dos resultados deve considerar o caráter exploratório da pesquisa e a ausência de replicatas experimentais por fração granulométrica, fatores que restringem a aplicação de análises estatísticas inferenciais e a avaliação da variabilidade dos resultados. Adicionalmente, não foram realizados ensaios diretos de filtração, permeabilidade ou resistência ao cisalhamento, nem caracterização mineralógica detalhada. Consequentemente, não foi possível determinar quantitativamente a resistência hidráulica da torta filtrante, a taxa unitária de filtração (TUF), o tempo de ciclo, a umidade residual ou a estabilidade geotécnica dos materiais. Ressalta-se, ainda, que a equação empírica de Hazen (1911) apresenta limitações para materiais com elevada proporção de partículas finas, não substituindo ensaios específicos de condutividade hidráulica.

Para futuras investigações, recomenda-se a realização de ensaios de filtração em escala laboratorial ou piloto, contemplando diferentes composições granulométricas, teores de sólidos, condições de pressão ou vácuo e meios filtrantes. A utilização de replicatas experimentais e delineamentos estatísticos adequados permitirá avaliar a variabilidade dos resultados e investigar quantitativamente as relações entre granulometria, composição química e desempenho do desaguamento.

Recomenda-se complementar a caracterização granuloquímica com técnicas de identificação e análise mineralógica, como MLA ou QEMSCAN, além de realizar ensaios de permeabilidade, compactação e resistência ao cisalhamento. A integração desses resultados poderá fundamentar o desenvolvimento e a validação de modelos preditivos e fornecer subsídios experimentais para avaliar a viabilidade técnica e operacional do empilhamento a seco de rejeitos fosfáticos.

REFERÊNCIAS

Abouzeid, A.-Z. M. (2008). Physical and thermal treatment of phosphate ores: An overview. *International Journal of Mineral Processing, 85*(4), 59-84. https://doi.org/10.1016/j.minpro.2007.09.001

Allen, T. (2013). *Particle size measurement* (5th ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4899-3063-7

Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2016). *NBR 7181: Solo: Análise granulométrica*. ABNT.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

ASTM International. (2017a). *ASTM D2487-17: Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System).* ASTM International. https://doi.org/10.1520/D2487-17

ASTM International. (2017b). *ASTM D6913/D6913M-17: Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/D6913_D6913M-17

Baltar, C. A. M. (2018). Agregação na separação sólido-líquido. In A. B. Luz, J. A. Sampaio, & S. C. A. França (Orgs.), *Tratamento de minérios* (6a ed., pp. 513-545). CETEM/MCTI.

Cacciuttolo, C., & Atencio, E. (2023). Dry stacking of filtered tailings for large-scale production rates over 100,000 metric tons per day. *Minerals, 13*(11), 1445. https://doi.org/10.3390/min13111445

Chang, B., Du, C., Wang, Y., Chu, X., & Zhang, L. (2022). Modeling of permeability coefficient calculations based on mesostructure parameters of tailings. *ACS Omega, 7*(7), 5625-5635. https://doi.org/10.1021/acsomega.1c03676

Das, B. M. (2014). *Principles of geotechnical engineering* (8th ed.). Cengage Learning.

Das, B. M., & Sobhan, K. (2018). *Principles of geotechnical engineering* (9th ed.). Cengage Learning.

Davies, M. P., Lupo, J., Martin, T., McRoberts, E., Musse, M., & Ritchie, D. (2011). Dewatered tailings practice: Trends and observations. In *Tailings and Mine Waste 2010 Proceedings* (pp. 133-142). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b10569-19

Dong, T., Cao, P., Gui, R., Lin, Q., & Liu, Z. (2021). Experimental study on permeability coefficient in layered fine tailings under seepage conditions. *Geofluids, 2021*, Article 8850138. https://doi.org/10.1155/2021/8850138

Fränkle, B., Morsch, P., Sok, T., Gleiß, M., & Nirschl, H. (2022). Tailings filtration using recessed plate filter presses: Improving filter media selection by replicating abrasive wear. *Mining, 2*(2), 425-437. https://doi.org/10.3390/mining2020022

Fuerstenau, M. C., & Han, K. N. (2003). *Principles of mineral processing*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.

Guldris León, L., Hogmalm, K. J., & Bengtsson, M. (2020). Understanding mineral liberation during crushing using grade-by-size analysis: A case study of the Penouta Sn-Ta mineralization, Spain. *Minerals, 10*(2), 164. https://doi.org/10.3390/min10020164

Gupta, A., & Yan, D. S. (2006). *Mineral processing design and operation: An introduction*. Elsevier.

Hamraoui, L., Bergani, A., Ettoumi, M., Aboulaich, A., Taha, Y., Khalil, A., Neculita, C. M., & Benzaazoua, M. (2024). Towards a circular economy in the mining industry: Advanced mineral tailings dewatering. *Minerals, 14*(3), 319. https://doi.org/10.3390/min14030319

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Hazen, A. (1911). Discussion of “Dams on sand foundations” by A. C. Koenig. *Transactions of the American Society of Civil Engineers, 73*(3), 199–203.

International Council on Mining and Metals. (2021). *Tailings management: Good practice guide*. ICMM. https://hub.icmm.com/website/publications/pdfs/environmental-stewardship/2021/guidance_tailings-management.pdf

Kaswalder, F., Cavalli, D., Hawkey, J., & Paglianti, A. (2018). Tailings dewatering by pressure filtration: Process optimisation and design criteria. In R. J. Jewell & A. B. Fourie (Eds.), *Paste 2018: Proceedings of the 21st International Seminar on Paste and Thickened Tailings* (pp. 427-438). Australian Centre for Geomechanics. https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1805_35_Kaswalder

Li, F., Fan, Y., Fu, Y., Ma, X., Dong, X., Zhu, Y., Xiao, W., & Fang, W. (2026). Study on the dewatering mechanism of fine phosphate tailings slurrys based on the particle-agent interaction and sedimentation property. *Separations, 13*(4), 118. https://doi.org/10.3390/separations13040118

Mdachi, D. D., Rugaika, A. M., & Machunda, R. L. (2024). Valorization potentials of phosphate tailings at Minjingu mines in northern Tanzania. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 124*(7), 415-420. https://doi.org/10.17159/2411-9717/2857/2024

Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Olcay, R. H., Valadão, G. E., Araujo, A. C., Reyes, I. A., & Flores, M. U. (2024). Dewatering of fine tailings for disposal in dams using a column thickener, deep cone classifier, and hyperbaric filtration. Mining, Metallurgy & Exploration, 41(1), 335–344. https://doi.org/10.1007/s42461-023-00900-4

Otoo, R., Razavi, M., Abankwa, B., Armah, A., Donkor, S., & Brakohiapa, E. (2025). Review of the combined effects of mineralogy and particle size on tailings dewatering mechanism. *American Journal of Mining and Metallurgy, 8*(1), 13-19. https://doi.org/10.12691/ajmm-8-1-2

Rosin, P., & Rammler, E. (1933). The laws governing the fineness of powdered coal. *Journal of the Institute of Fuel, 7*, 29-36.

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Tiller, F. M., & Tsai, C.-D. (1986). Theory of filtration of ceramics: I. Slip casting. *Journal of the American Ceramic Society, 69*(12), 882-887. https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1986.tb07388.x

Wakeman, R. J., & Tarleton, E. S. (2005). *Solid/liquid separation: Principles of industrial filtration*. Elsevier.

Wang, C., Harbottle, D., Liu, Q., & Xu, Z. (2014). Current state of fine mineral tailings treatment: A critical review on theory and practice. *Minerals Engineering, 58*, 113-131. https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.01.018

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

Wills, B. A., & Finch, J. A. (2015). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (8th ed.). Butterworth-Heinemann.

Wills, B. A., & Napier-Munn, T. (2006). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (7th ed.). Butterworth-Heinemann.

Xing, S., Jia, J., Zheng, C., Wang, C., Wang, H., & Guo, Y. (2026). Study on permeability characteristics of tailings sand considering particle features. *Frontiers in Earth Science, 14*, Article 1799052. https://doi.org/10.3389/feart.2026.1799052

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.