

Série Tecnologia Mineral

**Uma revisão sobre as
metodologias e limitações
aplicadas aos estudos
laboratoriais de lixiviação
em pilhas**

**Marisa Nascimento
Paulo Sergio Moreira Soares**



SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

**Uma revisão sobre as metodologias e limitações
aplicadas aos estudos laboratoriais de lixiviação em
pilhas**

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Luiz Inácio Lula da Silva

Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Luciana Santos

Ministra de Estado

Luis Manuel Rebelo Fernandes

Secretário Executivo

Isa Assef dos Santos

Subsecretária de Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Silvia Cristina Alves França

Diretora

Robson Araujo D’Avila

Coordenador de Administração - COADM

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Coordenadora de Planejamento, Gestão e Inovação - COPGI

Paulo Fernando Almeida Braga

Coordenador de Processamento e Tecnologias Minerais - COPTM

Marisa Nascimento

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais - COPMA

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

Coordenador de Rochas Ornamentais - CORON

Arnaldo Alcover Neto

Coordenador de Análises Minerais - COAMI

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

ISSN 0103-7382

STM - 106

Uma revisão sobre metodologias e limitações aplicadas aos estudos laboratoriais de lixiviação em pilhas

Marisa Nascimento

Doutora em Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Paulo Sergio Moreira Soares

Doutor em Processos Químicos e Bioquímicos

CETEM/MCTI

2026

SÉRIE TECNOLOGIA MINERAL

Editor: Marisa Bezerra de Mello Monte

Subeditor: Paulo Fernando Almeida Braga

CONSELHO EDITORIAL: Achilles Junqueira Bourdot Dutra (UFRJ), Denilson da Silva Costa (UNIFESSPA), Hudson Jean Bianchini Couto (CETEM), Elves Matiolo (CETEM), Iranildes Daniel Santos (VALE-ITV), Marisa Nascimento (CETEM), Ivo André Homrich Schneider (UFRGS), Carina Ulsen (EPUSP).

No ano de 2023 a *Série Tecnologia Mineral* completa 44 anos de sua primeira publicação, iniciada com o trabalho “Flotação de Carvão – Estudos em Escala de Bancada” de autoria dos Engenheiros Antonio Campos, Salvador Almeida e Amílcar Santos. Desde então foram publicados 104 séries de diversos pesquisadores do CETEM ou externos a instituição versando sobre o tema tecnologia mineral.

A *Série Tecnologia Mineral* é dedicada à inovação e desenvolvimento em processamento mineral e metalurgia extrativa. Fazem parte do escopo da série tópicos de pesquisa e práticas operacionais que incluem caracterização mineralógica, métodos de cominuição (britagem e moagem), processos gravíticos, separação magnética, flotação, desaguamento, métodos químicos, bio-, hidro-, eletro- e pirometalurgia (metalurgia extrativa), processos de controle, instrumentação e simulações computacionais. Problemas ambientais relativos ao desenvolvimento sustentável, balanço de ciclo de vida de produtos e matérias primas minerais e avanços no processamento mineral também são abordados.

Na *Série Tecnologia Mineral*, são publicadas revisões, estudos e trabalhos de PD&I desenvolvidos no CETEM ou em parceria.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Copyright © 2026 CETEM/MCTI

Todos os direitos reservados.
Qualquer parte desta publicação pode ser reproduzida, desde que citada a fonte e atribuídos os devidos créditos. (Lei n. 9.610, de 19/2/1998)

Valéria Cristina de Souza
Diagramação e Editoração Eletrônica

André Luiz Costa Alves
Projeto Gráfico

Informações:
CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Av. Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
Homepage: www.cetem.gov.br

CIP – Catalogação na Publicação

N244r

Nascimento, Marisa.

Uma revisão sobre as metodologias e limitações aplicadas aos estudos laboratoriais de lixiviação em pilhas / Marisa Nascimento, Paulo Sergio Moreira Soares. – Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2026.

54 p. – (Série Tecnologia Mineral, 106).

ISBN 978-65-5919-111-6

1. Lixiviação em pilhas. 2. Ensaios em colunas. 3. Hidrometalurgia.
1. Soares, Paulo Sergio Moreira. II. Centro de Tecnologia Mineral.
III. Título. V. Série.

CDD 669.028

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do CETEM/MCTI
Bibliotecário(a) Rosana Silva de Oliveira CRB7 – 5849

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUÇÃO	9
2 ASPECTOS HIDROMETALÚRGICOS FUNDAMENTAIS DA LIXIVIAÇÃO EM PILHAS	15
3 ENSAIOS LABORATORIAIS EM COLUNAS	22
4 PREPARAÇÃO DO MINÉRIO	30
5 PROBLEMAS EXPERIMENTAIS E LIMITAÇÕES DOS ENSAIOS EM COLUNAS	36
6 ESCALONAMENTO DOS ENSAIOS LABORATORIAIS	41
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS	47
8 DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA	50
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51

RESUMO

A lixiviação em pilhas constitui uma das principais tecnologias hidrometalúrgicas empregadas no aproveitamento de minérios de baixo teor, rejeitos minerais e materiais estratégicos. O desempenho desse processo depende da interação entre fenômenos químicos, físicos e hidrodinâmicos que controlam a dissolução das espécies de interesse, o transporte de massa e o comportamento hidráulico do leito mineral. Nesse contexto, os ensaios laboratoriais em colunas representam a principal ferramenta experimental utilizada para avaliação preliminar do potencial de lixiviação de diferentes materiais e para geração de informações destinadas ao desenvolvimento e ao escalonamento de processos. O presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre os fundamentos hidrometalúrgicos da lixiviação em pilhas, abordando os principais mecanismos envolvidos no processo, os aspectos relacionados à preparação do minério e as metodologias empregadas em ensaios laboratoriais em colunas. São discutidos fatores como granulometria, aglomeração, cura, distribuição da solução lixiviante, permeabilidade do leito e estabilidade física do minério, bem como os principais problemas experimentais associados aos ensaios de bancada, incluindo efeitos de parede, segregação granulométrica, retenção de solução, formação de canais preferenciais e geração de partículas finas. A revisão evidencia a importância da adequada preparação do minério, do controle experimental rigoroso e da interpretação crítica dos resultados para aumentar a confiabilidade das previsões relacionadas ao desempenho de operações de lixiviação em pilhas.

Palavras-chave

Lixiviação em pilhas; Ensaios em colunas; Hidrometalurgia.

ABSTRACT

Heap leaching is one of the main hydrometallurgical technologies employed for the processing of low-grade ores, mineral wastes, and strategic raw materials. The performance of this process depends on the interaction of chemical, physical, and hydrodynamic phenomena governing the dissolution of valuable species, mass transfer, and the hydraulic behavior of the ore bed. In this context, laboratory column tests constitute the primary experimental tool for the preliminary assessment of the leaching potential of different materials and for generating data to support process development and scale-up. This study presents a literature review on the hydrometallurgical fundamentals of heap leaching, addressing the main mechanisms involved in the process, aspects related to ore preparation, and the methodologies employed in laboratory column testing. Factors such as particle size distribution, agglomeration, curing, leaching solution distribution, bed permeability, and ore physical stability are discussed, together with the principal experimental challenges associated with bench-scale column tests, including wall effects, particle size segregation, solution retention, preferential flow channeling, and the generation of fine particles. Overall, the review highlights the importance of proper ore preparation, rigorous experimental control, and critical interpretation of experimental results to improve the reliability of predictions regarding the performance of heap leaching operations.

Keywords

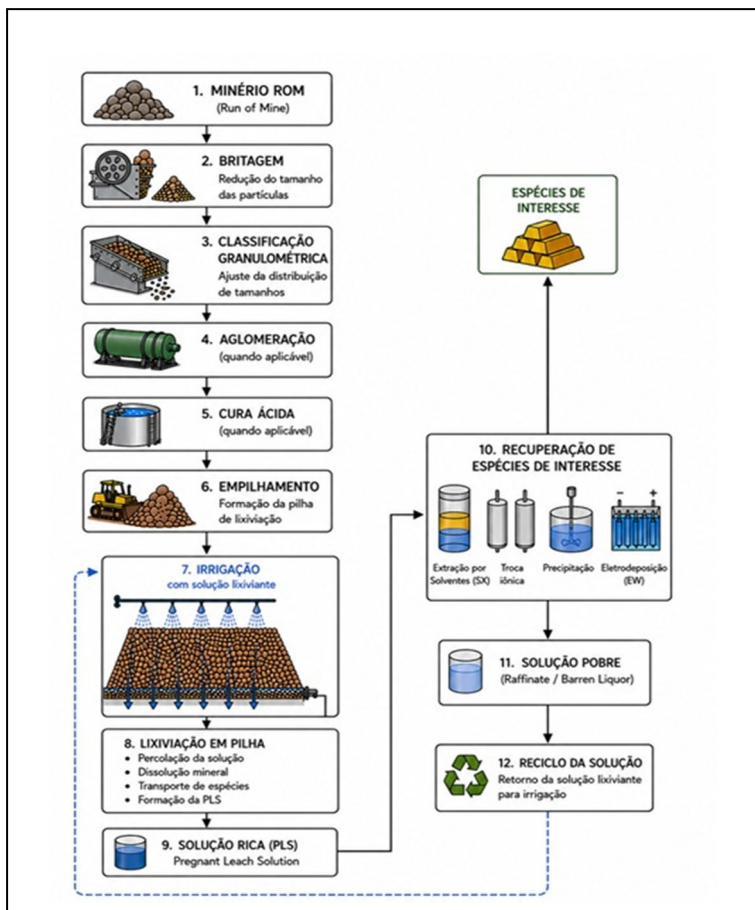
Heap Leaching; Columns Tests; Hydrometallurgy.

1 | INTRODUÇÃO

A lixiviação em pilhas (heap leaching) constitui uma das tecnologias hidrometalúrgicas mais importantes para o aproveitamento de minérios de baixo teor, rejeitos minerais e materiais considerados economicamente marginais para outras rotas convencionais de processamento. O método baseia-se na aplicação controlada de soluções lixiviantes sobre um leito mineral previamente preparado, promovendo a dissolução seletiva de espécies de interesse e permitindo sua posterior recuperação por processos hidrometalúrgicos complementares, como precipitação química, extração por solventes, troca iônica ou eletrodeposição (Figura 1).

O desenvolvimento industrial da lixiviação em pilhas esteve historicamente associado à necessidade de aproveitamento econômico de grandes volumes de minério de baixos teores. A expansão dessa tecnologia foi favorecida pela simplicidade operacional, pelos menores custos de implantação e pelo reduzido consumo energético quando comparada a processos que envolvem moagem fina e lixiviação agitada (Bartlett, 1997). Essas características permitiram a exploração de depósitos anteriormente considerados inviáveis, contribuindo para a ampliação da base de recursos minerais economicamente aproveitáveis.

Atualmente, a lixiviação em pilhas é amplamente empregada na recuperação de cobre, ouro, prata, urânio, níquel e zinco. Nos últimos anos, entretanto, a crescente demanda por matérias-primas associadas à transição energética e ao desenvolvimento de tecnologias avançadas tem estimulado o uso dessa rota no processamento de lítio, terras-raras, cobalto, manganês e fosfatos.



Fonte: Elaborada pelos autores com geração gráfica assistida pelo ChatGPT (OpenAI), 2026.

Figura 1. Fluxograma simplificado das principais etapas envolvidas em operações de lixiviação em pilhas, desde a preparação do minério até a recuperação das espécies de interesse.

Como consequência, aumentou significativamente o interesse pelo desenvolvimento de metodologias experimentais capazes de representar adequadamente o comportamento hidrometalúrgico de matérias-primas complexas e de elevada heterogeneidade física e mineralógica.

A evolução da lixiviação em pilhas está diretamente relacionada aos avanços obtidos na compreensão dos fenômenos hidrodinâmicos, no desenvolvimento de técnicas de preparação e aglomeração de minérios e no aprimoramento das metodologias laboratoriais utilizadas para simulação do processo. Nesse contexto, a capacidade de reproduzir, em escala experimental, os principais mecanismos observados em operações industriais tornou-se um dos fatores determinantes para o desenvolvimento de novos projetos de lixiviação em pilhas (Ghorbani et al., 2016).

Embora o princípio operacional da lixiviação em pilhas seja relativamente simples, os fenômenos envolvidos apresentam elevada complexidade. Durante a operação ocorrem simultaneamente processos de dissolução mineral, transferência de massa, transporte de solução, retenção hídrica, compactação do leito, precipitação secundária e redistribuição hidráulica. A interação entre esses mecanismos modifica continuamente as condições internas da pilha, dificultando a previsão do comportamento metalúrgico do sistema exclusivamente a partir de análises químicas ou observações simplificadas.

De acordo com Free (2013), o desempenho de sistemas hidrometalúrgicos percolativos depende da interação entre a cinética das reações de dissolução, a disponibilidade de área superficial reativa e as limitações de transporte de massa impostas pelo meio poroso. Em operações industriais, essas variáveis são

fortemente influenciadas pelas características físicas do minério, incluindo granulometria, permeabilidade, porosidade, estabilidade mecânica e presença de partículas finas ou minerais argilosos.

O comportamento hidráulico da pilha exerce papel igualmente importante no desempenho do processo. Distribuições não uniformes da solução lixiviante podem reduzir significativamente o contato efetivo entre sólido e líquido, favorecendo a formação de zonas de baixa circulação, caminhos preferenciais de fluxo e regiões parcialmente saturadas. Em muitos casos, limitações hidráulicas tornam-se mais relevantes para a recuperação das espécies de interesse do que os próprios mecanismos químicos de dissolução mineral (Bouffard e Dixon, 2001).

Nesse cenário, a preparação do minério assume papel central no sucesso operacional da lixiviação em pilhas. Operações como britagem, classificação granulométrica, ajuste de umidade, aglomeração e cura ácida influenciam diretamente a permeabilidade do leito e a distribuição da solução lixiviante.

Problemas relacionados à preparação inadequada do minério estão entre as principais causas de perda de desempenho em operações industriais, especialmente em sistemas contendo elevada proporção de partículas finas ou materiais argilosos (Bouffard, 2005).

A necessidade de compreender e controlar esses fenômenos impulsionou o desenvolvimento de diferentes metodologias experimentais destinadas à avaliação preliminar do comportamento de minérios submetidos à lixiviação percolativa. Entre elas destacam-se os ensaios de garrafa (bottle roll tests), os testes de percolação, os ensaios em colunas e os estudos piloto.

Cada metodologia apresenta vantagens e limitações próprias, variando quanto à complexidade operacional e ao grau de representatividade em relação às condições industriais.

Os ensaios em colunas destacam-se como a principal ferramenta laboratorial utilizada para simular processos de lixiviação em pilhas. Esses ensaios apresentam maior representatividade hidrodinâmica do que os testes agitados, uma vez que permitem reproduzir, ainda que de forma simplificada, o escoamento percolativo característico das pilhas industriais. Além da avaliação da recuperação de espécies de interesse e do consumo de reagentes, os ensaios em colunas possibilitam investigar aspectos relacionados à permeabilidade do leito, retenção de solução, estabilidade física do minério e evolução do comportamento hidráulico ao longo do tempo (Taylor, 2011).

Entretanto, a extrapolação dos resultados laboratoriais para escala industrial deve ser realizada com cautela. Conforme discutido por Kappes (2002), diferenças significativas de escala afetam diretamente a compactação do minério, a distribuição da solução lixivante, a heterogeneidade do sistema e o desenvolvimento de fenômenos de longo prazo. De maneira semelhante, Petersen e Dixon (2002) destacam que diversos processos observados em pilhas industriais não são completamente reproduzidos em colunas laboratoriais convencionais, especialmente aqueles relacionados à redistribuição hidráulica, à precipitação secundária e à evolução estrutural do leito mineral.

Apesar dessas limitações, os ensaios laboratoriais permanecem indispensáveis para o desenvolvimento de novas rotas hidrometalúrgicas e para a avaliação preliminar de minérios destinados à lixiviação em pilhas. Nos últimos anos, a integração entre monitoramento hidráulico, caracterização mineralógica

avançada e modelagem computacional tem contribuído para ampliar significativamente a capacidade preditiva desses estudos. Segundo Petersen (2016), a combinação entre dados experimentais e ferramentas de modelagem representa uma das principais tendências para aumento da confiabilidade das previsões relacionadas ao comportamento industrial das pilhas.

Diante da crescente utilização da lixiviação em pilhas no processamento de minérios críticos e estratégicos, torna-se fundamental compreender os fatores que influenciam a preparação do minério, a execução dos ensaios laboratoriais e a interpretação dos resultados obtidos. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta uma breve revisão bibliográfica sobre os fundamentos hidrometalúrgicos da lixiviação em pilhas, os principais aspectos relacionados à preparação do minério e as metodologias empregadas em ensaios laboratoriais em colunas. São discutidos os parâmetros operacionais mais relevantes, os problemas experimentais frequentemente observados e as limitações associadas à extrapolação dos resultados para escala piloto ou industrial.

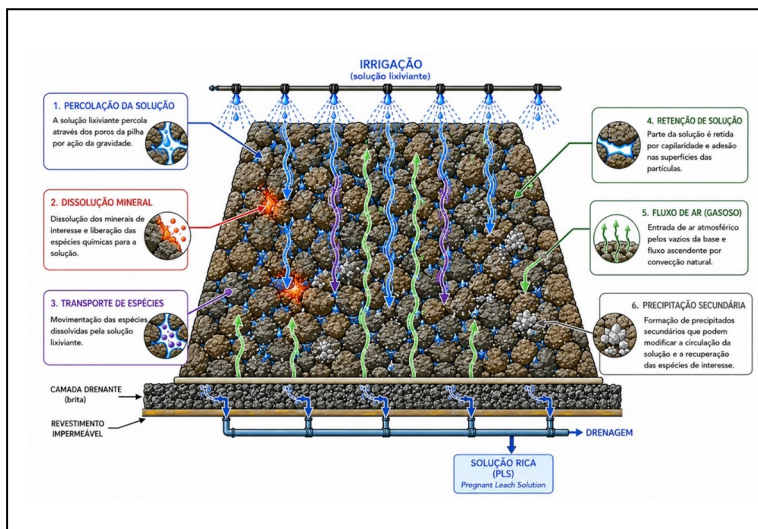
2 | ASPECTOS HIDROMETALÚRGICOS FUNDAMENTAIS DA LIXIVIAÇÃO EM PILHAS

A lixiviação em pilhas consiste em um processo hidrometalúrgico no qual uma solução química é aplicada sobre um leito de minério previamente preparado, promovendo a dissolução seletiva de espécies de interesse e permitindo sua posterior recuperação por diferentes operações unitárias. O desempenho do processo resulta da interação simultânea de fenômenos químicos, físicos e hidrodinâmicos que ocorrem no interior do leito mineral (Figura 2).

O mecanismo básico da lixiviação em pilha envolve o contato entre a solução lixiviante e as superfícies reativas presentes nas partículas minerais. Durante esse processo, reagentes dissolvidos promovem a solubilização das fases portadoras dos elementos de interesse, gerando espécies químicas que são transportadas pela solução até serem coletadas na base da pilha. A eficiência desse mecanismo depende não apenas da reatividade mineralógica do sistema, mas também da capacidade da solução em acessar de forma uniforme as superfícies disponíveis para reação.

A taxa global de extração em sistemas hidrometalúrgicos é controlada pela combinação entre cinética química e fenômenos de transferência de massa. Em muitos casos, a velocidade de dissolução não é limitada exclusivamente pela reação química propriamente dita, mas pela dificuldade de transporte dos reagentes até a superfície mineral e dos produtos dissolvidos para o meio líquido circundante (Free, 2013). Dessa forma, alterações nas características físicas do leito podem exercer influência significativa sobre a recuperação metalúrgica obtida.

A área superficial específica do minério constitui um dos principais fatores que influenciam a eficiência da lixiviação. Em geral, a redução granulométrica aumenta a superfície disponível para reação e reduz as distâncias de difusão no interior das partículas. Como consequência, partículas menores tendem a apresentar velocidades de dissolução mais elevadas. Entretanto, a britagem excessiva pode produzir quantidades significativas de material fino, comprometendo o comportamento hidráulico do sistema e reduzindo a eficiência da percolação.



Fonte: Elaborada pelos autores com geração gráfica assistida pelo ChatGPT (OpenAI), 2026.

Figura 2. Representação esquemática dos principais fenômenos físicos, químicos e hidrodinâmicos envolvidos em operações de lixiviação em pilhas.

A definição da granulometria adequada representa um compromisso entre o aumento da recuperação metalúrgica e a manutenção de condições satisfatórias de permeabilidade. Em operações industriais, a seleção da faixa granulométrica é normalmente realizada considerando simultaneamente aspectos metalúrgicos, operacionais e econômicos (Kappes, 2002).

Além das características granulométricas, a mineralogia do minério exerce influência direta sobre o desempenho da lixiviação. Diferentes minerais apresentam comportamentos distintos em relação à dissolução química, ao consumo de reagentes e à formação de produtos secundários. Em muitos depósitos, minerais da ganga podem consumir quantidades significativas de ácido ou outros reagentes, reduzindo a eficiência global do processo e aumentando os custos operacionais.

A preparação adequada do minério torna-se particularmente importante em matérias-primas contendo minerais argilosos ou elevadas proporções de partículas finas. Esses materiais apresentam maior tendência à retenção de solução, redução de permeabilidade e desenvolvimento de condições hidráulicas desfavoráveis ao processo de lixiviação (Bouffard, 2005).

O comportamento hidráulico do leito mineral constitui um dos aspectos mais relevantes da operação de sistemas de lixiviação em pilhas. A solução lixivante deve percolar através do meio poroso de maneira suficientemente uniforme para garantir contato adequado com o material mineralizado. Quando o fluxo ocorre de forma homogênea, a utilização dos reagentes tende a ser mais eficiente e a recuperação do processo mais elevada, entretanto, a distribuição da solução raramente ocorre de forma perfeitamente uniforme. Heterogeneidades granulométricas, variações de permeabilidade e diferenças locais de compactação podem

modificar significativamente os padrões de fluxo no interior do leito (Bouffard e Dixon, 2001). Como consequência, determinadas regiões recebem volumes excessivos de solução, enquanto outras permanecem parcialmente irrigadas ou até mesmo sem contato efetivo com o lixiviante.

Essas variações promovem o surgimento de caminhos preferenciais de escoamento, fenômeno frequentemente observado em sistemas de lixiviação percolativa. Nesses casos, parte significativa da solução percorre trajetórias de menor resistência hidráulica, reduzindo a eficiência do contato sólido-líquido e comprometendo o aproveitamento do minério presente em regiões menos acessíveis do leito.

A permeabilidade constitui a propriedade que descreve a facilidade com que a solução se desloca através do material particulado. Valores elevados de permeabilidade favorecem a drenagem e a circulação da solução, enquanto valores reduzidos podem resultar em aumento da retenção hídrica e desenvolvimento de zonas de drenagem deficiente.

A presença de partículas finas desempenha papel central nesse contexto. O aumento do teor de finos pode reduzir significativamente a permeabilidade do leito, dificultando a percolação da solução e comprometendo a eficiência da lixiviação. Esse efeito é particularmente relevante em materiais submetidos à degradação mecânica durante a preparação, o empilhamento ou a própria operação de lixiviação (McClelland, Pool e Eisele, 1983).

Bouffard (2005) destaca que a geração e a migração de partículas finas constituem algumas das principais causas de deterioração das condições hidráulicas em operações de lixiviação em pilhas.

O acúmulo desses materiais nos espaços entre as partículas reduz a conectividade dos poros, favorecendo a retenção de solução e dificultando a drenagem adequada do sistema.

Outro aspecto relevante corresponde à retenção de solução no interior do leito mineral. Uma parcela da solução alimentada permanece temporariamente armazenada nos poros e nas superfícies das partículas, sendo posteriormente drenada ou evaporada. Embora a retenção seja um fenômeno natural em sistemas porosos, valores excessivos podem modificar significativamente o comportamento hidráulico do processo.

A retenção de solução influencia diretamente a distribuição de fluxo, os tempos de residência e o balanço hídrico dos sistemas de lixiviação. Em condições extremas, podem ocorrer zonas parcialmente saturadas que dificultam a circulação simultânea de solução e ar, alterando o desempenho global do processo (Robertson, 2024).

Além dos fenômenos hidráulicos, a precipitação secundária também pode influenciar o comportamento da pilha ao longo do tempo. Durante a lixiviação, mudanças de pH, potencial redox, concentração de espécies dissolvidas e condições locais de saturação podem favorecer a formação de novos compostos sólidos no interior do leito.

Esses precipitados podem obstruir poros, reduzir a permeabilidade e dificultar o transporte de reagentes. Embora a intensidade do fenômeno varie de acordo com a mineralogia e as condições operacionais, a precipitação secundária é frequentemente considerada um dos principais fatores responsáveis pela deterioração progressiva das condições hidráulicas em operações de longa duração.

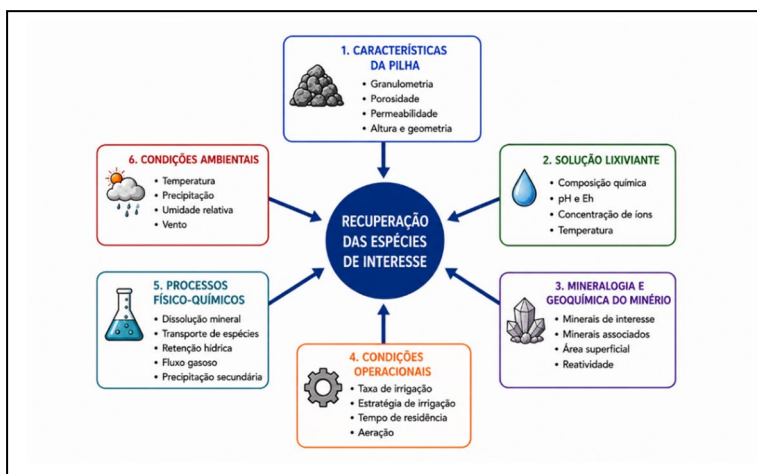
A estabilidade física do minério constitui outro elemento fundamental para o desempenho da lixiviação. Durante a operação podem ocorrer rearranjos estruturais, compactação diferencial e degradação de partículas, modificando gradualmente a estrutura interna do leito. Essas alterações influenciam simultaneamente a permeabilidade, a distribuição da solução e a eficiência das reações hidrometalúrgicas.

As condições ambientais também podem influenciar significativamente o desempenho de operações de lixiviação em pilhas. Fatores como temperatura, precipitação pluviométrica, umidade relativa do ar e velocidade do vento afetam o balanço hídrico do sistema, modificando a evaporação, a retenção de solução e a distribuição do fluxo no interior do leito mineral. Em operações conduzidas sob condições climáticas adversas, essas variáveis podem alterar a eficiência de contato entre a solução lixiviante e o minério, influenciando diretamente a recuperação das espécies de interesse. Assim, as condições ambientais podem constituir um dos fatores responsáveis pelas diferenças observadas entre o comportamento de sistemas laboratoriais e operações de maior escala.

Segundo Ghorbani et al. (2016), a compreensão integrada dos fenômenos químicos, físicos e hidrodinâmicos entre outros, tais como os aspectos ambientais, representa um dos principais desafios para a otimização de sistemas modernos de lixiviação em pilhas (Figura 3). O comportamento do processo resulta da interação contínua entre essas variáveis, tornando necessária uma abordagem multidisciplinar para o desenvolvimento de projetos, a interpretação de resultados experimentais e a extrapolação para escala piloto ou industrial.

Dessa forma, a avaliação adequada de sistemas de lixiviação em pilhas exige não apenas o conhecimento das reações químicas envolvidas, mas também a compreensão dos mecanismos de transporte, das propriedades físicas do minério e dos fatores que controlam o comportamento hidráulico do leito mineral.

Esses aspectos constituem a base conceitual necessária para a interpretação dos ensaios laboratoriais discutidos nos capítulos seguintes.



Fonte: Elaborada pelos autores com geração gráfica assistida pelo ChatGPT (OpenAI), 2026.

Figura 3. Interação entre os principais fatores que controlam a recuperação de espécies em operações de lixiviação em pilhas.

3 | ENSAIOS LABORATORIAIS EM COLUNAS

Os ensaios laboratoriais em colunas constituem uma das principais ferramentas utilizadas para avaliação preliminar do comportamento de minérios submetidos à lixiviação percolativa. Esses ensaios procuram reproduzir, em escala reduzida e sob condições controladas, os mecanismos fundamentais observados em operações industriais de lixiviação em pilhas, permitindo a obtenção de informações relevantes para o desenvolvimento de rotas hidrometalúrgicas, seleção de condições operacionais e estimativa do desempenho metalúrgico de diferentes materiais.

Em comparação com ensaios agitados convencionais, os testes em colunas apresentam maior representatividade física do processo industrial, uma vez que reproduzem o escoamento gravitacional da solução através de um leito mineral estático. Essa característica permite avaliar simultaneamente aspectos metalúrgicos e hidráulicos do sistema, fornecendo informações que dificilmente seriam obtidas por meio de testes de lixiviação realizados em recipientes agitados (Taylor, 2011).

Os ensaios em colunas são amplamente empregados em estudos envolvendo cobre, ouro, urânio, níquel, zinco, lítio, fosfatos e elementos terras-raras. Dependendo dos objetivos do estudo, podem ser utilizados para determinar recuperações metalúrgicas, consumo de reagentes, cinética de extração, comportamento hidráulico do leito, estabilidade física do minério e influência de diferentes condições operacionais sobre o desempenho do processo.

A configuração experimental normalmente consiste em um cilindro vertical preenchido com minério previamente preparado, sobre o qual é aplicada uma solução lixivante em regime contínuo ou intermitente. Durante o ensaio, a solução percola através do

leito mineral e é coletada na base da coluna (pregnant leaching solution - PLS) para posterior caracterização química e acompanhamento dos parâmetros operacionais (Figura 4).



Fonte: Elaborada pelos autores com geração gráfica assistida pelo ChatGPT (OpenAI), 2026.

Figura 4. Esquema laboratorial em colunas para avaliação da lixiviação em pilhas.

As dimensões das colunas variam consideravelmente em função dos objetivos experimentais. Na literatura técnica são encontrados equipamentos com diâmetros entre aproximadamente 50 e 300 mm e alturas variando entre 0,5 e 3 m. A seleção adequada das dimensões da coluna é importante para minimizar distorções associadas aos efeitos de escala e melhorar a representatividade dos resultados experimentais (Bouffard e Dixon, 2001).

A relação entre altura e diâmetro da coluna constitui um parâmetro particularmente relevante. Colunas excessivamente curtas podem não reproduzir adequadamente os gradientes

hidráulicos observados em sistemas industriais, enquanto colunas de pequeno diâmetro podem apresentar maior sensibilidade a heterogeneidades locais de carregamento. Dessa forma, a definição da geometria experimental deve considerar simultaneamente aspectos operacionais, disponibilidade de material e objetivos do estudo.

Um exemplo prático da influência da geometria das colunas foi reportado por Zeballos e Ayquipa (2024) durante os estudos de viabilidade do Projeto Trapiche, localizado na região de Apurímac, Peru. Os autores conduziram ensaios de lixiviação utilizando colunas de 1 m, 3 m e 6 m de altura, todas com diâmetro de 6 polegadas (152 mm), empregando o mesmo minério de cobre britado e aglomerado. Para evitar distorções associadas ao efeito de escala, a taxa de irrigação não foi mantida constante entre as colunas, sendo ajustada proporcionalmente à massa de minério contida em cada equipamento. As taxas aplicadas foram de 3,8; 1,9 e 0,6 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$ para as colunas de 1 m, 3 m e 6 m, respectivamente, simulando uma pilha industrial com altura de bancada de 8 m e irrigação de 5 $\text{L}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}$. Após 184 dias de lixiviação, as recuperações de cobre foram muito semelhantes, variando entre 71,2% e 73,0%, demonstrando que colunas mais curtas podem reproduzir adequadamente a cinética de extração quando a vazão é ajustada em função da massa de minério. Entretanto, parâmetros hidráulicos e químicos apresentaram diferenças significativas, com o consumo de ácido aumentando de 15,9 kg/t na coluna de 1 m para 20,4 kg/t na coluna de 6 m. Os resultados mostrados na Tabela 1 evidenciaram que a altura da coluna exerce influência mais pronunciada sobre o comportamento hidrodinâmico e o consumo de reagentes sobre uma mesma recuperação final do cobre.

Tabela 1. Efeito da geometria da coluna sobre parâmetros metalúrgicos e operacionais observados durante os estudos de lixiviação do Projeto Trapiche (Peru).

Altura da coluna	Diâmetro	Recuperação Cu (%)	Consumo de ácido (kg/t)
1 m	152 mm	73,0	15,9
3 m	152 mm	72,3	17,5
6 m	152 mm	71,2	20,4

Fonte: Zeballos e Ayquipa, 2024.

O carregamento da coluna representa uma etapa crítica do procedimento experimental. Após a preparação granulométrica e eventual aglomeração do minério, o material é introduzido cuidadosamente no equipamento, buscando-se minimizar segregação granulométrica e variações excessivas de densidade ao longo do leito. A uniformidade do material carregado exerce influência direta sobre o comportamento hidráulico observado durante a lixiviação (McClelland, Pool e Eisele, 1983).

A densidade aparente do leito é normalmente determinada após o carregamento da coluna e constitui um importante parâmetro de controle experimental. Variações significativas nesse parâmetro podem influenciar a porosidade do sistema e dificultar a comparação entre diferentes ensaios.

A importância do controle da densidade aparente durante o carregamento da coluna foi demonstrada por Arellano et al. (2022) em estudos realizados com minério de cobre aglomerado.

Os autores verificaram que a densidade aparente inicial do material era da ordem de $1,50 \text{ g/cm}^3$, aumentando progressivamente com a aplicação de cargas equivalentes às observadas em pilhas industriais e atingindo valores próximos de $2,00 \text{ g/cm}^3$. Em colunas instrumentadas, foram observadas densidades variando entre aproximadamente $1,50\text{--}1,60 \text{ g/cm}^3$ nas regiões superiores e até $2,20 \text{ g/cm}^3$ na base do leito. Esse aumento de compactação foi acompanhado por uma redução da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) de $1,99 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ para $2,2 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$. Os resultados evidenciaram que pequenas variações no carregamento e na densidade aparente podem produzir alterações significativas no comportamento hidráulico do sistema, reforçando a necessidade de procedimentos padronizados de preenchimento e controle da densidade do leito durante ensaios laboratoriais de lixiviação.

O sistema de distribuição da solução lixiviante também desempenha papel fundamental na qualidade dos resultados obtidos. O objetivo principal é promover uma aplicação o mais uniforme possível do lixiviante sobre a superfície da coluna, reduzindo a ocorrência de concentrações de fluxo localizadas. Para isso, são frequentemente utilizados distribuidores perfurados, aspersores, gotejadores ou sistemas de irrigação por gravidade.

A taxa de irrigação constitui uma das principais variáveis operacionais em sistemas de lixiviação percolativa (Free, 2013). Valores muito elevados podem aumentar a retenção de solução e reduzir a eficiência de contato entre reagente e minério, enquanto taxas excessivamente baixas podem prolongar desnecessariamente o tempo de ensaio e limitar a transferência de massa.

A influência da taxa de irrigação foi avaliada por Arellano et al. (2022) em ensaios com minério de cobre britado, aglomerado e

curado. Os autores utilizaram colunas, com 1,50 m de altura e 0,538 m de diâmetro, preenchidas com minério a uma densidade aparente seca-alvo de $1,50 \text{ g/cm}^3$. A taxa-alvo de irrigação foi de $9,1 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, equivalente a 38 mL/min, aplicada por um único emissor localizado no centro da coluna. No ensaio de referência, a taxa total foi aplicada desde o início, resultando em colapso localizado da estrutura dos aglomerados, formação de empoçamento superficial e desenvolvimento de fluxo preferencial até aproximadamente 30 cm de profundidade. Nos ensaios com aumento gradual da irrigação, especialmente no regime de rampa lenta, observou-se menor consolidação do minério, ausência de empoçamento e redução do fluxo preferencial. Esses resultados demonstram que a taxa de irrigação e, principalmente, sua forma de aplicação inicial influenciam diretamente a estabilidade do leito, a distribuição da solução e a representatividade hidráulica dos ensaios em colunas.

A definição da composição da solução lixiviante depende diretamente da mineralogia do minério estudado e dos objetivos experimentais. Em ensaios envolvendo minérios oxidados de cobre, por exemplo, utiliza-se frequentemente ácido sulfúrico como agente lixiviante. Em sistemas auríferos predominam soluções cianetadas, enquanto estudos envolvendo terras-raras, fosfatos ou minerais industriais podem empregar diferentes combinações de ácidos minerais, sais ou agentes complexantes.

Durante a execução dos ensaios são monitorados diversos parâmetros operacionais, incluindo vazão de irrigação, volume drenado, pH, potencial redox, temperatura e composição química das soluções. A frequência de amostragem varia conforme os objetivos do estudo e a duração prevista do experimento.

O acompanhamento do volume de solução aplicado e recuperado constitui uma das etapas mais importantes do monitoramento experimental. O controle sistemático desses parâmetros permite avaliar o comportamento hidráulico do leito e identificar alterações associadas à retenção de solução, drenagem deficiente ou mudanças nas condições de fluxo durante o ensaio (Robertson, 2024).

As soluções coletadas na base da coluna são normalmente submetidas a análises químicas periódicas para determinação das concentrações dos elementos de interesse e dos principais constituintes da solução. A partir desses dados são calculadas recuperações metalúrgicas acumuladas, consumos de reagentes e balanços de massa.

Dependendo dos objetivos do trabalho, também podem ser realizados monitoramentos complementares envolvendo distribuição granulométrica, umidade residual, porosidade, densidade aparente e caracterização mineralógica dos resíduos gerados ao final da lixiviação. Essas informações permitem uma compreensão mais abrangente dos fenômenos ocorridos durante o experimento.

A duração dos ensaios em colunas apresenta grande variabilidade. Estudos preliminares podem ser conduzidos durante poucas semanas, enquanto programas de investigação tecnológica e projetos de engenharia frequentemente utilizam ensaios com duração de vários meses. A definição do período experimental deve considerar a cinética de dissolução do sistema estudado e os objetivos específicos da investigação.

A duração dos ensaios deve ser suficiente para representar adequadamente a cinética de dissolução e os fenômenos de transporte observados em condições reais de lixiviação.

Van Staden et al. (2009), em estudo voltado ao desenvolvimento de projeto de lixiviação em pilhas para um minério de níquel, relataram ensaios laboratoriais nos quais a duração inicialmente prevista era de 420 dias. Entretanto, os resultados experimentais indicaram que a extração de níquel foi completada após 210 dias, sendo o período entre 70 e 210 dias associado ao comportamento de uma pilha em estágio mais avançado de lixiviação. Esses resultados demonstraram que a duração dos ensaios pode ser ajustada com base na evolução experimental da extração e no balanço de reagentes, evitando tanto a interrupção prematura dos testes quanto a manutenção desnecessária de ensaios prolongados.

A interpretação dos resultados obtidos em ensaios de coluna deve levar em consideração as limitações inerentes à escala laboratorial. Embora esses testes representem uma das ferramentas mais importantes para avaliação de processos de lixiviação em pilhas, diferenças geométricas, operacionais e temporais em relação às pilhas piloto ou industriais podem influenciar significativamente os resultados observados (Kappes, 2002).

Apesar dessas limitações, os ensaios laboratoriais em colunas permanecem como a principal metodologia para investigação do comportamento de minérios submetidos à lixiviação percolativa. Sua capacidade de integrar informações metalúrgicas, hidráulicas e operacionais torna esses testes indispensáveis para o desenvolvimento de projetos hidrometalúrgicos e para a redução das incertezas associadas à implantação de operações piloto ou industriais de lixiviação em pilhas.

4 | PREPARAÇÃO DO MINÉRIO

A preparação do minério constitui uma das etapas mais importantes no desenvolvimento de processos de lixiviação em pilhas e exerce influência direta tanto sobre o desempenho metalúrgico quanto sobre o comportamento hidráulico do sistema. Embora a lixiviação seja frequentemente associada às reações químicas de dissolução mineral, diversos estudos demonstram que uma parcela significativa dos problemas operacionais observados em pilhas piloto ou industriais está relacionada às características físicas do material alimentado.

O sucesso de operações de lixiviação em pilhas depende, em grande medida, da capacidade de produzir um leito mineral que apresente simultaneamente boa acessibilidade química e condições adequadas de percolação da solução lixiviante (Bouffard, 2005). Dessa forma, as etapas de britagem, classificação granulométrica, homogeneização, ajuste de umidade, aglomeração e cura devem ser consideradas partes integrantes do processo hidrometalúrgico, e não apenas como operações preliminares de preparação de amostras (Figura 5).

A preparação adequada do minério busca estabelecer um equilíbrio entre dois objetivos frequentemente conflitantes. Por um lado, a redução granulométrica aumenta a superfície específica disponível para reação e favorece a dissolução dos minerais de interesse. Por outro, a geração excessiva de partículas finas pode comprometer a permeabilidade do leito e reduzir a eficiência global da lixiviação.

A britagem normalmente representa a primeira etapa do preparo de amostras destinadas aos ensaios em colunas. Em escala laboratorial, são amplamente utilizados britadores de mandíbulas, britadores de rolos e equipamentos de impacto, cuja seleção depende das características do minério e da granulometria final desejada.



Fonte: Elaborada pelos autores com geração gráfica assistida pelo ChatGPT (OpenAI), 2026.

Figura 5. Fluxograma simplificado das principais etapas de preparação do minério para ensaios laboratoriais em colunas de lixiviação.

A distribuição granulométrica utilizada nos ensaios laboratoriais deve reproduzir, sempre que possível, as condições previstas para a operação industrial. A utilização de materiais excessivamente finos pode resultar em recuperações artificialmente elevadas e mascarar problemas associados à circulação da solução que somente se manifestariam em condições reais de operação (Kappes, 2002).

Após a britagem, o material normalmente é submetido a peneiramento para definição da distribuição granulométrica desejada. Essa etapa permite eliminar frações inadequadas para o estudo (se for o caso) e avaliar o efeito do tamanho de partícula sobre o desempenho do processo.

A influência dos finos torna-se ainda mais importante em materiais contendo argilas, minerais hidratados ou partículas friáveis. Bouffard e Dixon (2001) relatam que esses materiais apresentam maior tendência à degradação física durante a operação, gerando partículas adicionais capazes de alterar progressivamente as condições hidráulicas do sistema.

A heterogeneidade mineralógica também deve ser considerada durante a preparação das amostras. Em muitos depósitos, os minerais de interesse não estão distribuídos uniformemente entre as diferentes frações granulométricas, fazendo com que pequenas variações na amostragem ou no peneiramento possam produzir diferenças significativas nos resultados experimentais.

A representatividade da amostra constitui um dos fatores mais importantes para a interpretação adequada dos resultados de lixiviação (Rosenqvist, 2004). Por essa razão, procedimentos de homogeneização e quarteramento devem ser executados com rigor, especialmente em estudos envolvendo materiais heterogêneos ou depósitos de baixa homogeneidade mineralógica.

Após a definição da granulometria, o minério geralmente é submetido a ajuste de umidade. Embora muitas vezes tratada como uma etapa simples, a distribuição uniforme da água exerce influência importante sobre a estabilidade física do material e sobre a eficiência das etapas subsequentes de preparação.

Distribuições inadequadas de umidade podem comprometer a formação de aglomerados homogêneos e favorecer o desenvolvimento de heterogeneidades no leito mineral (McClelland, Pool e Eisele, 1983). Dessa forma, a homogeneização adequada do material úmido constitui uma etapa importante para garantir a reprodutibilidade dos ensaios.

Um outro aspecto importante é a aglomeração. Em minérios contendo elevada proporção de partículas finas por exemplo, a aglomeração é frequentemente empregada para melhorar as características físicas do material antes da lixiviação. O processo consiste na formação de agregados relativamente estáveis a partir da combinação de partículas minerais, solução líquida e, em alguns casos, agentes ligantes.

A aglomeração representa uma das técnicas mais eficazes para melhoria das condições operacionais de minérios com elevada proporção de finos. A formação de aglomerados promove aumento da permeabilidade aparente do leito e reduz problemas associados à segregação e à migração de partículas finas (Bouffard, 2005).

A eficiência do processo depende de diversos fatores, incluindo granulometria, mineralogia, teor de umidade, intensidade de mistura e composição química da solução utilizada. Em escala laboratorial, a aglomeração pode ser realizada em tambores rotativos, discos pelotizadores ou misturadores mecânicos de pequeno porte.

O uso de agentes ligantes constitui uma alternativa amplamente empregada quando os aglomerados apresentam baixa resistência mecânica. Lewandowski, Komar e Kawatra (2009) citam que a utilização de ligantes pode aumentar significativamente a estabilidade física dos aglomerados, reduzindo sua degradação durante a irrigação contínua e contribuindo para a manutenção das características hidráulicas do sistema ao longo da lixiviação.

Após a aglomeração, muitos processos utilizam uma etapa de cura antes do início da irrigação. Esse procedimento consiste em manter o material preparado em repouso durante determinado período, permitindo a redistribuição dos reagentes e o desenvolvimento de reações preliminares no interior do minério.

Uma cura ácida favorece uma distribuição mais uniforme do ácido no interior dos aglomerados e promove reações antecipadas com minerais consumidores de reagente. Como consequência, parte do consumo químico ocorre antes do início da lixiviação propriamente dita, contribuindo para maior estabilidade operacional do processo (Bouffard, 2005).

O tempo de cura varia de acordo com a mineralogia do minério, a concentração do reagente e os objetivos do estudo. Condições inadequadas de cura podem comprometer a eficiência da preparação do material e influenciar negativamente o desempenho metalúrgico observado durante a lixiviação (Kappes, 2002).

Além dos aspectos relacionados à granulometria e à química do sistema, a estabilidade mecânica do minério constitui um fator de grande relevância para o desempenho de longo prazo. Alguns materiais mantêm suas características físicas praticamente inalteradas durante a operação, enquanto outros apresentam degradação progressiva associada à ação da solução lixiviante e às tensões mecânicas presentes no leito.

Como já referido, a geração de partículas finas durante a operação pode alterar progressivamente as condições hidráulicas do sistema e comprometer a circulação da solução. Esse comportamento é particularmente importante em materiais argilosos, lateríticos e fosfáticos, que frequentemente apresentam elevada sensibilidade à degradação das partículas.

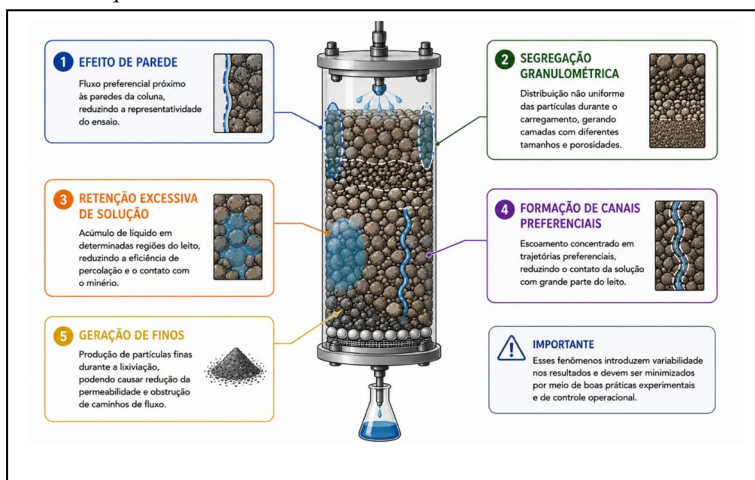
Em operações de longa duração, a degradação mecânica pode atuar simultaneamente com a precipitação secundária de compostos insolúveis, produzindo alterações graduais na estrutura do leito mineral. De acordo com Bouffard (2005) e Petersen (2016), a interação entre esses fenômenos constitui um dos principais desafios operacionais associados aos sistemas modernos de lixiviação em pilhas.

Nos últimos anos, o crescente interesse por minerais críticos ou estratégicos, ou ainda matérias-primas com mineralogia mais complexa têm ampliado a importância das etapas de preparação mineral. Materiais contendo argilas iônicas, lateritas, fosfatos e outras matrizes de elevada heterogeneidade apresentam desafios específicos que exigem abordagens diferenciadas de britagem, aglomeração e controle hidráulico.

O desenvolvimento de técnicas avançadas de aglomeração e de controle do comportamento hidráulico desempenha papel cada vez mais importante na viabilização hidrometalúrgica de depósitos minerais complexos (Ghorbani et al., 2016). Nesse contexto, a preparação do minério deve ser compreendida como uma etapa estratégica do processo, capaz de influenciar diretamente a eficiência metalúrgica, a estabilidade operacional e a viabilidade econômica da lixiviação em pilhas.

5 | PROBLEMAS EXPERIMENTAIS E LIMITAÇÕES DOS ENSAIOS EM COLUNAS

Embora os ensaios laboratoriais em colunas representem a principal ferramenta utilizada para avaliação de processos de lixiviação em pilhas, diversos fatores podem comprometer a qualidade e a representatividade dos resultados obtidos (Figura 6). As limitações associadas à escala de bancada decorrem não apenas das diferenças geométricas em relação às pilhas industriais, mas também de dificuldades relacionadas à preparação do minério, ao controle operacional e à própria complexidade dos fenômenos físicos e químicos envolvidos.



Fonte: Elaborada pelos autores com geração gráfica assistida pelo ChatGPT (OpenAI), 2026.

Figura 6. Principais fatores de variabilidade experimental observadas em ensaios laboratoriais de lixiviação em colunas.

A interpretação adequada dos resultados experimentais exige compreensão das limitações inerentes aos sistemas laboratoriais e dos efeitos que essas limitações podem exercer sobre a extrapolação dos dados para escala piloto ou industrial (Kappes, 2002). Dessa forma, a análise crítica dos ensaios torna-se tão importante quanto a obtenção dos resultados propriamente ditos.

Uma das principais fontes de incerteza está associada à geometria da coluna utilizada. Em sistemas de pequeno diâmetro, os chamados efeitos de parede podem influenciar significativamente a distribuição interna do fluxo. Nessas condições, a região próxima às paredes tende a apresentar comportamento hidráulico distinto daquele observado na porção central do leito, reduzindo a representatividade do ensaio.

Bartlett (1997) e Robertson (2024) reportam que os efeitos de parede tornam-se mais pronunciados à medida que diminui a relação entre o diâmetro da coluna e o tamanho das partículas. Como consequência, parte da solução pode escoar preferencialmente pelas regiões periféricas do leito, alterando os padrões de percolação esperados para sistemas de maior escala.

Além da geometria da coluna, o carregamento do minério representa uma etapa crítica da metodologia experimental. Pequenas diferenças na forma de preenchimento do equipamento podem gerar variações na densidade aparente, na distribuição granulométrica interna e na estrutura dos vazios presentes no leito mineral.

Procedimentos inadequados de carregamento podem aumentar significativamente a variabilidade experimental dos ensaios de lixiviação. Segregação granulométrica, formação de regiões mais

compactadas e distribuição não uniforme do material constituem algumas das principais causas de dispersão dos resultados observados em diferentes experimentos (McClelland, Pool e Eisele, 1983).

Outro aspecto importante refere-se à distribuição da solução lixiviante na superfície da coluna. Mesmo quando a vazão aplicada é mantida constante, pequenas diferenças no sistema de irrigação podem produzir alterações significativas na forma como a solução penetra e se distribui ao longo do leito.

A obtenção de uma distribuição superficial uniforme representa um dos principais desafios experimentais dos ensaios de lixiviação em colunas. Deficiências nessa etapa podem favorecer o desenvolvimento precoce de caminhos preferenciais de fluxo, comprometendo a representatividade dos resultados obtidos (Bouffard, 2005).

A degradação física do minério durante a operação também pode constituir uma importante fonte de incerteza experimental. Em determinados materiais ocorre fragmentação progressiva das partículas ao longo da lixiviação, promovendo alterações graduais nas características do leito. Em ensaios de longa duração, essas alterações podem resultar em diferenças substanciais entre as condições iniciais e finais da coluna, dificultando a interpretação dos resultados (Bouffard, 2005).

A retenção de solução constitui outro fenômeno frequentemente observado em estudos laboratoriais. Parte do líquido aplicado permanece temporariamente armazenada no interior do leito devido a mecanismos capilares e interações superficiais entre solução e partículas minerais.

A retenção excessiva de solução pode dificultar o fechamento adequado do balanço hídrico experimental e influenciar a

interpretação dos resultados de lixiviação. Em sistemas contendo elevado teor de finos ou minerais argilosos, esse fenômeno tende a apresentar maior intensidade (Robertson, 2024).

Além da retenção de solução, a precipitação secundária de compostos insolúveis pode alterar progressivamente as condições internas da coluna. Durante a operação podem formar-se sulfatos básicos, hidróxidos metálicos, sílica amorfa e outros precipitados capazes de modificar a estrutura do meio poroso. A precipitação secundária pode contribuir para a redução gradual da permeabilidade e para alterações nas condições químicas do sistema. Em ensaios envolvendo reciclo de solução ou elevadas concentrações de espécies dissolvidas, esse fenômeno tende a assumir maior relevância (Petersen e Dixon, 2002).

A evaporação representa outra fonte potencial de erro experimental, especialmente em ensaios de longa duração conduzidos sob condições ambientais não controladas. Embora muitas vezes negligenciada, a perda de água por evaporação pode modificar a composição química das soluções e interferir nos balanços de massa e volume.

Processos evaporativos podem favorecer a concentração local de espécies dissolvidas e contribuir para a ocorrência de precipitações secundárias. Em estudos envolvendo soluções altamente concentradas, a consideração desse efeito torna-se particularmente importante (Free, 2013).

A representatividade da amostra utilizada constitui outra limitação importante dos estudos laboratoriais. Em muitos casos, a massa de minério empregada em uma coluna corresponde a uma fração extremamente pequena do volume total que seria processado em escala industrial.

De fato, depósitos minerais frequentemente apresentam elevada heterogeneidade física, granulométrica e mineralógica. Como consequência, pequenas amostras podem não reproduzir adequadamente a variabilidade natural do minério, introduzindo incertezas adicionais na interpretação dos resultados (Rosenqvist, 2004).

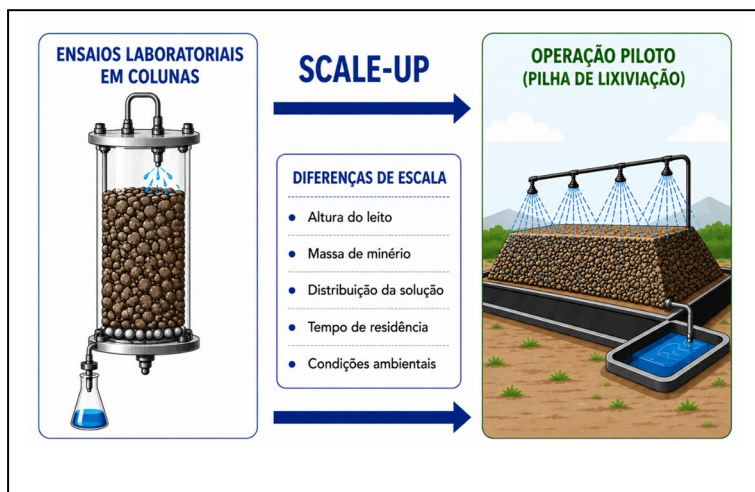
As limitações temporais também devem ser consideradas. Enquanto muitos ensaios laboratoriais possuem duração de semanas ou poucos meses, operações industriais frequentemente permanecem ativas por períodos muito superiores. Diversos fenômenos de evolução lenta podem, portanto, não ser completamente observados em experimentos convencionais de bancada. Alterações associadas à compactação progressiva, degradação física do minério e reorganização estrutural do leito tornam-se mais evidentes em períodos prolongados de operação (Van Staden et al., 2018).

Apesar dessas restrições, os testes em colunas continuam sendo ferramentas indispensáveis para o desenvolvimento de processos hidrometalúrgicos. A obtenção de resultados confiáveis depende da adoção de procedimentos experimentais rigorosos, da adequada caracterização do minério e da interpretação crítica dos dados gerados.

A maior confiabilidade dos estudos de lixiviação é alcançada quando os ensaios laboratoriais são utilizados em conjunto com modelagem matemática, monitoramento hidráulico detalhado e programas de validação em escala piloto. Essa abordagem integrada permite reduzir as incertezas associadas à extrapolação dos resultados e aumentar a robustez das previsões relacionadas ao comportamento industrial do processo (Dixon e Petersen, 2003).

6 | ESCALONAMENTO DOS ENSAIOS LABORATORIAIS

A extrapolação dos resultados obtidos em ensaios laboratoriais para condições piloto/industriais constitui uma das etapas mais críticas do desenvolvimento de processos de lixiviação em pilhas. Embora os testes em colunas forneçam informações valiosas sobre recuperação de espécies de interesse, consumo de reagentes e comportamento do minério, a conversão desses resultados em parâmetros de projeto exige compreensão adequada das diferenças existentes entre os sistemas de bancada e as operações piloto/comerciais (Figura 7).



Fonte: Elaborada pelos autores com geração gráfica assistida pelo ChatGPT (OpenAI), 2026.

Figura 7. Representação conceitual do processo de escalonamento (scale-up) de ensaios de lixiviação em colunas para operações piloto/industriais.

A principal função dos ensaios laboratoriais não é reproduzir exatamente o comportamento industrial, mas fornecer informações confiáveis para comparação de alternativas de processo e avaliação preliminar da viabilidade técnica de determinada rota hidrometalúrgica (Kappes, 2002). Dessa forma, os resultados devem ser interpretados dentro do contexto das limitações inerentes à escala experimental.

Uma das diferenças mais importantes entre sistemas laboratoriais e piloto/industriais está relacionada às dimensões do leito mineral. Enquanto colunas de bancada normalmente apresentam alturas de poucos metros ou menos, pilhas piloto/industriais frequentemente podem atingir dezenas de metros de altura. Essa diferença modifica significativamente as condições mecânicas internas do sistema.

O aumento da altura da pilha resulta em maiores tensões compressivas sobre as camadas inferiores do minério, favorecendo compactação progressiva e alterações nas propriedades hidráulicas do leito. Como consequência, a permeabilidade observada em laboratório nem sempre representa adequadamente o comportamento de pilhas industriais de grande porte (Van Staden et al., 2018).

Além dos efeitos mecânicos, a distribuição da solução lixivante torna-se progressivamente mais complexa à medida que aumenta o tamanho do sistema. Em operações industriais, o fluxo é influenciado por heterogeneidades granulométricas, diferenças mineralógicas, variações locais de compactação e características construtivas da pilha.

A distribuição hidráulica em pilhas industriais raramente ocorre de maneira uniforme. Regiões de diferentes permeabilidades podem favorecer redistribuição da solução e desenvolvimento de

trajetórias preferenciais de escoamento, fenômenos que normalmente apresentam menor intensidade em sistemas laboratoriais cuidadosamente controlados (Bouffard e Dixon, 2001).

Outro fator importante refere-se à heterogeneidade natural dos depósitos minerais. Em laboratório, os ensaios são conduzidos utilizando amostras relativamente homogêneas e previamente preparadas. Em escala industrial, entretanto, a variabilidade mineralógica e granulométrica do minério tende a ser muito mais pronunciada. Diferenças locais na composição mineralógica podem influenciar simultaneamente a cinética de dissolução, o consumo de reagentes e a formação de produtos secundários. Essa variabilidade dificulta a extrapolação direta dos resultados laboratoriais e reforça a necessidade de programas de amostragem representativos durante as etapas de caracterização tecnológica (Rosenqvist, 2004).

O fator tempo também exerce influência significativa sobre o processo de escalonamento. Enquanto muitos ensaios laboratoriais são conduzidos durante semanas ou poucos meses, pilhas industriais frequentemente permanecem em operação durante períodos muito mais longos.

Essa diferença temporal favorece o desenvolvimento de fenômenos de evolução lenta, como degradação física do minério, alterações estruturais do leito e formação gradual de precipitados secundários (Bouffard, 2005). Esses processos podem modificar progressivamente as condições hidráulicas da pilha ao longo da operação, influenciando o desempenho metalúrgico observado em longo prazo.

A precipitação secundária constitui um exemplo importante desse comportamento. Durante operações prolongadas, compostos insolúveis podem acumular-se gradualmente nos espaços porosos do minério, alterando a circulação da solução e modificando o comportamento hidráulico do sistema (Petersen e Dixon, 2002).

Outro aspecto relevante refere-se às condições ambientais. Em escala industrial, fatores como temperatura ambiente, precipitação pluviométrica, radiação solar, velocidade do vento e evaporação podem influenciar significativamente o balanço hídrico e o desempenho da pilha.

As condições climáticas podem modificar a distribuição da solução, a retenção hídrica e a concentração das espécies químicas presentes no sistema. Em laboratório, essas variáveis normalmente permanecem sob maior controle, reduzindo sua influência sobre os resultados experimentais (Robertson, 2024).

Além das diferenças físicas e operacionais, o escalonamento envolve desafios relacionados à previsão do desempenho futuro do processo. Recuperações obtidas em laboratório não devem ser interpretadas como valores absolutos a serem reproduzidos industrialmente, mas como indicadores do potencial de desempenho do sistema sob condições controladas. Os ensaios laboratoriais devem ser utilizados principalmente como ferramentas comparativas, permitindo avaliar tendências operacionais e comparar diferentes condições de processo. A extrapolação para escala industrial requer a integração dessas informações com dados de modelagem, experiência operacional e testes piloto (Dixon e Petersen, 2003).

Nesse contexto, a modelagem matemática vem assumindo papel cada vez mais importante no desenvolvimento de projetos de lixiviação em pilhas. Modelos hidrodinâmicos, modelos de

transporte de massa e simulações multiparâmetros permitem complementar os dados experimentais e explorar cenários operacionais que dificilmente poderiam ser avaliados exclusivamente por ensaios laboratoriais. A integração entre dados experimentais e modelagem computacional representa uma das principais ferramentas para aumento da confiabilidade das previsões relacionadas ao comportamento industrial das pilhas. Essa abordagem permite reduzir incertezas e melhorar a qualidade das decisões associadas ao projeto e à operação dos sistemas (Petersen, 2016).

Os testes piloto também desempenham papel fundamental no processo de escalonamento. Situados entre a escala laboratorial e a operação industrial, esses estudos permitem avaliar o comportamento do minério sob condições mais próximas da realidade operacional, reduzindo os riscos associados à implantação do processo.

Programas de desenvolvimento tecnológico bem-sucedidos normalmente envolvem uma sequência progressiva de estudos que inclui caracterização mineralógica, ensaios laboratoriais, testes piloto e validação industrial. A utilização integrada dessas ferramentas aumenta significativamente a confiabilidade das estimativas de desempenho e reduz as incertezas associadas ao projeto.

Avanços em monitoramento hidráulico, caracterização mineralógica e modelagem computacional vêm ampliando a capacidade preditiva dos estudos de escalonamento. Técnicas modernas de monitoramento permitem acompanhar com maior detalhe a evolução dos fenômenos hidráulicos em sistemas

percolativos, fornecendo informações importantes para calibração de modelos e validação de hipóteses experimentais (Robertson, 2024).

Além disso, o crescente interesse por minérios complexos, materiais lateríticos, argilas iônicas e depósitos contendo elementos críticos e estratégicos tem estimulado o desenvolvimento de metodologias experimentais mais representativas das condições industriais. A evolução dessas metodologias é fundamental para ampliar a aplicação da lixiviação em pilhas a novos tipos de recursos minerais (Ghorbani et al., 2016).

Dessa forma, o sucesso do escalonamento em processos de lixiviação em pilhas depende da interpretação integrada dos resultados laboratoriais, da compreensão dos fenômenos físicos e químicos envolvidos e da utilização complementar de ferramentas de modelagem e validação experimental. Embora nenhum ensaio de bancada seja capaz de reproduzir integralmente a complexidade das operações industriais, a combinação adequada dessas abordagens permite reduzir incertezas e aumentar significativamente a confiabilidade dos projetos hidrometalúrgicos.

7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

A lixiviação em pilhas permanece como uma das tecnologias hidrometalúrgicas mais relevantes para o aproveitamento de recursos minerais de baixo teor, especialmente em cenários nos quais a redução de custos operacionais e o aumento da eficiência energética constituem fatores estratégicos para a viabilidade dos empreendimentos. Embora a tecnologia esteja consolidada para diversos tipos de minério, o crescente interesse por minerais críticos e estratégicos tem impulsionado novas demandas de pesquisa e desenvolvimento.

A expansão dos mercados associados à transição energética, à eletrificação da mobilidade e às tecnologias digitais tem ampliado significativamente a necessidade de aproveitamento de recursos minerais anteriormente considerados complexos ou economicamente marginais. Como consequência, observa-se um aumento do interesse pela aplicação da lixiviação em pilhas no processamento de lítio, terras-raras, cobalto, manganês, níquel laterítico, fosfatos e argilas iônicas.

A evolução da tecnologia depende da integração entre avanços em preparação mineral, monitoramento operacional, modelagem computacional e controle hidráulico das pilhas. Nesse contexto, a capacidade de compreender e controlar os fenômenos físicos associados à circulação da solução tende a assumir importância crescente no desempenho dos sistemas de lixiviação.

A preparação do minério continuará desempenhando papel central nesse processo. O desenvolvimento de novas técnicas de aglomeração, agentes ligantes mais eficientes e metodologias de

estabilização física do leito deverá contribuir para o processamento de materiais com elevada proporção de finos, minerais argilosos ou características geotécnicas desfavoráveis. Esses avanços poderão ampliar significativamente o universo de minérios passíveis de aproveitamento por rotas percolativas.

Outro aspecto de grande relevância refere-se ao monitoramento hidráulico das pilhas. O aprimoramento das técnicas de acompanhamento do fluxo de solução e da retenção hídrica poderá fornecer informações mais detalhadas sobre o comportamento interno dos sistemas, contribuindo para a identificação precoce de problemas operacionais e para a otimização das condições de lixiviação.

Paralelamente, observa-se crescente incorporação de ferramentas de modelagem computacional no desenvolvimento de projetos hidrometalúrgicos. Modelos integrados de transporte de massa, fluxo multifásico, cinética de dissolução e comportamento hidráulico vêm sendo utilizados para complementar dados experimentais e reduzir incertezas associadas ao projeto e à operação de pilhas industriais.

A combinação entre ensaios laboratoriais, monitoramento operacional e modelagem matemática representa uma das abordagens mais promissoras para aumento da confiabilidade das previsões de desempenho em sistemas de lixiviação em pilhas. Essa tendência deverá se intensificar à medida que novas ferramentas computacionais se tornem mais acessíveis e robustas.

Além dos avanços tecnológicos, questões ambientais e de sustentabilidade tendem a influenciar cada vez mais o desenvolvimento futuro da lixiviação em pilhas. A redução do

consumo de água, a otimização do uso de reagentes e o aproveitamento de rejeitos e materiais de baixo teor constituem temas de crescente interesse tanto para a indústria quanto para a comunidade científica.

Nesse cenário, os ensaios laboratoriais em colunas continuarão desempenhando papel fundamental no desenvolvimento de novas rotas de processamento. Entretanto, sua utilização deverá ocorrer de forma cada vez mais integrada com os aspectos tecnológicos e ambientais já citados, ampliando a capacidade de interpretação dos resultados e reduzindo as incertezas associadas ao escalonamento.

8 | DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL GENERATIVA

Na elaboração desta publicação, os autores utilizaram a ferramenta ChatGPT, da OpenAI, como recurso de apoio à estruturação e organização do manuscrito, à síntese e organização de conteúdos, à revisão e ao aprimoramento da redação e à geração das representações esquemáticas e dos fluxogramas apresentados nas figuras, com base na concepção, nas informações técnico-científicas e nas orientações fornecidas pelos autores. A ferramenta foi utilizada exclusivamente como recurso auxiliar, não constituindo fonte de autoridade científica. A seleção e interpretação das informações técnico-científicas, a utilização das fontes bibliográficas e a avaliação do conteúdo final são de responsabilidade dos autores, que assumem integral responsabilidade pela integridade, precisão e conteúdo desta publicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARELLANO, Á. D. B.; YAO, T.-M.; MILCZAREK, M.; BRUSSEAU, M. Column experiments to assess consolidation behaviour at different initial irrigation rates in copper heap leaching. In: HEAP LEACH SOLUTIONS 2022, 2022, Sparks. Proceedings [...] Sparks: Heap Leach Solutions, 2022. p. 259-270.
- BARTLETT, R. W. Metal extraction from ores by heap leaching. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v. 28, p. 529-545, 1997.
- BOUFFARD, S. C. Review of agglomeration practice and fundamentals in heap leaching. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, v. 26, p. 233-294, 2005.
- BOUFFARD, S.; DIXON, D. G. Investigative study into the hydrodynamics of heap leaching processes. *Metallurgical and Materials Transactions B*, v. 32, p. 763-776, 2001.
- CATHLES, L. M.; MURR, L. E. Large column leaching of low grade copper sulfide waste. *Journal of Metals*, v. 29, p. 14-20, 1977.
- DIXON, A. G. Correlations for wall and particle shape effects on fixed bed bulk voidage. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 66, p. 705-708, 1988.
- DIXON, D. G.; PETERSEN, J. Comprehensive modelling study of chalcocite column and heap bioleaching. In: RIVEROS, P. A.; DIXON, D. G.; DREISINGER, D. B.; MENACHO, J. (ed.). *Hydrometallurgy of Copper: proceedings of Copper 2003*. Montreal: CIM-MetSoc, 2003. v. 6 (Book 2), p. 493-516.
- FREE, M. L. *Hydrometallurgy: fundamentals and applications*. Hoboken: Wiley, 2013.

GHORBANI, Y.; BECKER, P. A.; MAINZA, A.; du PLESSIS, M. N.; ZHANG, W.; PETERSEN, J.; BARNARD, A. Heap leaching technology -- current state, innovations and future directions: a review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, v. 37, p. 73-119, 2016.

KAPPES, D. W. Precious metal heap leach design and practice. In: MULAR, A. L.; HALBE, D. N.; BARRATT, D. J. (eds.). *Mineral processing plant design, practice, and control*. Littleton: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME), 2002. p. 1606-1630.

LEWANDOWSKI, K. A.; KAWATRA, S. K. Agglomeration binders to improve efficiency of copper heap leaching. In: *SME ANNUAL MEETING*, 2007.

LEWANDOWSKI, K. A.; KOMAR, S.; KAWATRA, S. K. Binders for heap leaching agglomeration. *Minerals & Metallurgical Processing*, v. 26, p. 14-24, 2009.

LIPIEC, I. A.; BAUTISTA, R. G. Considerations in the extraction of metal from heap leaches. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, v. 51, p. 7-16, 1998.

MCCLELLAND, G. E.; POOL, D. L.; EISELE, J. A. *Agglomeration – heap leaching operations in the precious metals industry*. Washington: U.S. Bureau of Mines, 1983.

PETERSEN, J. Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores – A brief overview. *Hydrometallurgy*, v. 165, p. 206-212, 2016.

PETERSEN, J.; DIXON, D. G. Systematic modelling of heap leach processes for optimisation and design. *Proceedings of the EPD Congress, TMS Annual Meeting*, 2002.

ROBERTSON, S. *Properties governing the flow of solution and air through crushed ore for heap leaching*. Cape Town: University of Cape Town, 2024.

ROSENQVIST, T. Principles of extractive metallurgy. Trondheim: Tapir Academic Press, 2004.

TAYLOR, A. Keys to Successful Gold Heap Leaching. ALTA Metallurgical Services, Perth, 2011.

VAN STADEN, P. J.; MASINGA, A. M. N. M. N.; RAMOTSHO, M. M.; TSHABALALA, N. D. The effects of simulated stacking phenomena on heap leaching performance. Minerals Engineering, v. 125, p. 143-152, 2018.

VAN STADEN, P. J.; ROBERTSON, S. W.; GERICKE, M.; NEALE, J. W.; SEYEDBAGHERI, A. Maximising the value derived from laboratory testwork towards heap leaching design. In: FIFTH SOUTHERN AFRICAN BASE METALS CONFERENCE, 2009, Kasane, Botswana. Proceedings [...]. Johannesburg: Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2009. p. 185-200.

ZEBALLOS, F.; AYQUIPA, J. Solution rate techniques for column copper ore leaching testing. In: ALTA Copper Conference 2024. Perth: ALTA Metallurgical Services, 2024.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2025, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 390 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <https://www.gov.br/cetem/pt-br/assuntos/repositorio-mineralis-e-biblioteca>.

Últimos números da Série Tecnologia Mineral

STM-105 – Processamento de diamantes sintéticos presentes em resíduos de teares multifio diamantados. Francisco Wilson Hollanda Vidal, Victor Moza Ponciano, Phillipe Fernandes de Almeida e Mateus Valentim Simmer Sopleto, 2024.

STM-104 – Tecnologias de extração de lítio de pegmatitos. Gabriely Fornazier Brunhara e Paulo Fernando Almeida Braga, 2021.

STM-103 – Inovações tecnológicas para o tratamento dos rejeitos de carvão visando a recuperação de áreas degradadas. Zuleica Carmen Castilhos, Ricardo Gonçalves Cesar, Silvia Gonçalves Egler, Renata Alamino, Danielly de Paiva Magalhães, Bruna Alves Pinheiro, Rafael Oliveira Dantas, Mariana Vezzzone Tosta Rabela, Aline Freire Serrano, Claudio Luiz Schneider, 2021.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
E-mail: biblioteca@cetem.gov.br
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.



Missão Institucional

Desenvolver tecnologias inovadoras e sustentáveis, e mobilizar competências visando superar desafios nacionais do setor mineral.

O CETEM

O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é um instituto de pesquisas, vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações - MCTI, dedicado ao desenvolvimento, à adaptação e à difusão de tecnologias nas áreas minerometalúrgica, de materiais e de meio ambiente.

Criado em 1978, o Centro está localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, na Cidade Universitária, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m² de área construída, que inclui 25 laboratórios, 4 plantas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.

Durante seus 48 anos de atividade, o CETEM desenvolveu mais de 800 projetos tecnológicos e prestou centenas de serviços para empresas atuantes nos setores minerometalúrgicos, químico e de materiais.