

TÉCNICO EM MINERAÇÃO



MÓDULO II TRATAMENTO DE MINÉRIOS



2025 - INEPROTEC

Diretor Pedagógico	EDILVO DE SOUSA SANTOS
Diagramação	MICHEL MARTINS NOGUEIRA
Capa	MICHEL MARTINS NOGUEIRA
Elaboração	INEPROTEC

Direitos Autorais: É proibida a reprodução parcial ou total desta publicação, por qualquer forma ou meio, sem a prévia autorização do INEPROTEC, com exceção do teor das questões de concursos públicos que, por serem atos oficiais, não são protegidas como Direitos Autorais, na forma do Artigo 8º, IV, da Lei 9.610/1998. Referida vedação se estende às características gráficas da obra e sua editoração. A punição para a violação dos Direitos Autorais é crime previsto no Artigo 184 do Código Penal e as sanções civis às violações dos Direitos Autorais estão previstas nos Artigos 101 a 110 da Lei 9.610/1998.

Atualizações: A presente obra pode apresentar atualizações futuras. Esforçamo-nos ao máximo para entregar ao leitor uma obra com a melhor qualidade possível e sem erros técnicos ou de conteúdo. No entanto, nem sempre isso ocorre, seja por motivo de alteração de software, interpretação ou falhas de diagramação e revisão. Sendo assim, disponibilizamos em nosso site a seção mencionada (Atualizações), na qual relataremos, com a devida correção, os erros encontrados na obra e sua versão disponível. Solicitamos, outros sim, que o leitor faça a gentileza de colaborar com a perfeição da obra, comunicando eventual erro encontrado por meio de mensagem para contato@ineprotec.com.br.

VERSÃO 2.0 (01.2025)

Todos os direitos reservados à
Ineprotec - Instituto de Ensino Profissionalizante e Técnico Eireli
Quadra 101, Conjunto: 02, Lote: 01 - Sobreloja
Recanto das Emas - CEP: 72.600-102 - Brasília/DF
E-mail: contato@ineprotec.com.br
www.ineprotec.com.br

Sumário

ABERTURA

SOBRE A INSTITUIÇÃO

- Educação Tecnológica, Inteligente e Eficiente
- Missão
- Visão
- Valores

SOBRE O CURSO

- Perfil profissional de conclusão e suas habilidades
- Quesitos fundamentais para atuação
- Campo de atuação
- Sugestões para Especialização Técnica
- Sugestões para Cursos de Graduação

SOBRE O MATERIAL

- Divisão do Conteúdo
- Boxes

BASE TEÓRICA

INTRODUÇÃO

FRAGMENTAÇÃO E COMINUIÇÃO

- Britagem
- Tipos de britadores
- Moagem
- Equipamentos de moagem
- Eficiência da Cominuição
- Importância da Liberação Mineral

PENEIRAMENTO E CLASSIFICAÇÃO

- Peneiramento
- Classificação
- Importância da Classificação Correta

SEQUÊNCIA E FLUXOGRAMA DE OPERAÇÕES

- Ordem das Operações
- Representação Gráfica

- Tipos de Fluxograma
- Importância do Fluxograma no Tratamento de Minérios

MÉTODOS FÍSICOS DE CONCENTRAÇÃO

- Concentração Gravimétrica
- Concentração Magnética
- Concentração Eletrostática
- Escolha do Método

FLOTAÇÃO

- Princípios da Flotação
- Reagentes Utilizados
- Tipos de Células de Flotação
- Vantagens e Limitações

HIDROMETALURGIA

- Etapas da Hidrometalurgia
- a) Lixiviação
- b) Purificação ou concentração da solução
- c) Recuperação do metal
- Vantagens e Desvantagens

BALANÇO DE MATERIAIS E GRAU DE RECUPERAÇÃO

- Balanço de Materiais
- Grau de Recuperação
- Importância Prática

SESSÕES ESPECIAIS

MAPA DE ESTUDO

SÍNTESE DIRETA

MOMENTO QUIZ

GABARITO DO QUIZ

REFERÊNCIAS

Abertura

SOBRE A INSTITUIÇÃO

Educação Tecnológica, Inteligente e Eficiente

O Instituto de Ensino Profissionalizante e Técnico (INEPROTEC) é uma instituição de ensino que valoriza o poder da educação e seu potencial de transformação.

Nascemos da missão de levar educação de qualidade para realmente impactar a vida dos nossos alunos. Acreditamos muito que a educação é a chave para a mudança.

Nosso propósito parte do princípio de que a educação transforma vidas. Por isso, nossa base é a inovação que, aliada à educação, resulta na formação de alunos de grande expressividade e impacto para a sociedade. Aqui no INEPROTEC, o casamento entre tecnologia, didática e interatividade é realmente levado a sério e todos os dias otimizado para constante e contínua evolução.

Missão

A nossa missão é ser símbolo de qualidade, ser referência na área educacional presencial e a distância, oferecendo e proporcionando o acesso e permanência a cursos técnicos, desenvolvendo e potencializando o talento dos estudantes, tornando-os, assim, profissionais de sucesso e cidadãos responsáveis e capazes de atuar como agentes de mudança na sociedade.

Visão

O INEPROTEC visa ser um instituto de ensino profissionalizante e técnico com reconhecimento nacional, comprometido com a qualidade e excelência de seus cursos, traçando pontes para oportunidades de sucesso, tornando-se, assim, objeto de desejo para os estudantes.

Valores

Ciente das qualificações exigidas pelo mercado de trabalho, o INEPROTEC tem uma visão que prioriza a valorização de cursos essenciais e pouco ofertados para profissionais que buscam sempre a atualização e especialização em sua área de atuação.

SOBRE O CURSO

O curso TÉCNICO EM MINERAÇÃO pertence ao Eixo Tecnológico de RECURSOS NATURAIS.

Vejamos algumas informações importantes sobre o curso TÉCNICO EM MINERAÇÃO relacionadas ao **perfil profissional de conclusão e suas habilidades**, **quesitos fundamentais para atuação**, **campo de atuação** e, também, algumas sugestões interessantes para continuação dos estudos optando por **Especializações Técnicas** e/ou **Cursos de Graduação**.

Perfil profissional de conclusão e suas habilidades

- Realizar atividades de prospecção, avaliação técnica e econômica, planejamento, extração e produção referentes aos recursos naturais.
- Prestar assistência técnica e assessoria ao estudo e ao desenvolvimento de projetos e pesquisas tecnológicas, ou aos trabalhos de vistoria, perícia, arbitramento e consultoria.
- Elaborar orçamentos, laudos, pareceres, relatórios e projetos, inclusive de incorporação de novas tecnologias.
- Realizar levantamento topográfico, sensoriamento remoto e geoprocessamento, conforme sua formação profissional.
- Auxiliar na caracterização de minérios sob os aspectos físico-químico, mineralógico e granulométrico.
- Executar projetos de desmonte, transporte e carregamento de minérios.
- Monitorar a estabilidade de rochas em minas subterrâneas e a céu aberto.
- Auxiliar no mapeamento geológico e amostragem em superfície e subsolo.
- Supervisionar, coordenar e operar equipamentos de fragmentação, de separação mineral, separação sólido/líquido, hidrometalúrgicos e de secagem.
- Supervisionar, coordenar e operar equipamentos de extração mineral, sondagem, perfuração, amostragem e transporte.
- Orientar e coordenar a execução de serviços de manutenção de equipamentos.
- Prestar assistência técnica na compra, venda e utilização de equipamentos especializados.

Quesitos fundamentais para atuação

- Conhecimentos e saberes relacionados aos recursos minerais e à proteção ambiental.

- Atualização em relação às inovações tecnológicas.
- Cooperação de forma construtiva e colaborativa nos trabalhos em equipe e tomada de decisões.
- Adoção de senso investigativo, visão sistêmica das atividades e processos, capacidade de comunicação e argumentação, autonomia, proatividade, liderança, respeito às diversidades nos grupos de trabalho, resiliência frente aos problemas, organização, responsabilidade, visão crítica, humanística, ética e consciência em relação ao impacto de sua atuação profissional na sociedade e no ambiente.

Campo de atuação

- Empresas públicas e privadas que atuam no desenvolvimento de soluções tecnológicas para exploração de recursos minerais.
- Instituições de assistência técnica, pesquisa, análise e experimentação.
- Empresas de consultoria.
- Empresas de mineração e de petróleo.
- Empresas de equipamentos de mineração.
- Centros de pesquisa em mineração.

Sugestões para Especialização Técnica

- Especialização Técnica em Mineralogia e Petrografia.
- Especialização Técnica em Caracterização Mineralógica.
- Especialização Técnica em Beneficiamento de Rochas Ornamentais.
- Especialização Técnica em Gestão Operacional de Produção com Enfoque na Mineração.
- Especialização Técnica em Caracterização Tecnológica de Rochas Ornamentais.
- Especialização Técnica em Pesquisa Mineral.
- Especialização Técnica em Topografia de Mineração.
- Especialização Técnica em Tratamento de Minérios.

Sugestões para Cursos de Graduação

- Curso Superior de Tecnologia em Agrimensura.
- Curso Superior de Tecnologia em Estradas.
- Curso Superior de Tecnologia em Beneficiamento de Minérios.
- Curso Superior de Tecnologia em Exploração de Recursos Minerais.
- Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental.
- Curso Superior de Tecnologia em Mineração.
- Curso Superior de Tecnologia em Petróleo e Gás.
- Curso Superior de Tecnologia em Produção Joalheira.
- Curso Superior de Tecnologia em Rochas Ornamentais.
- Bacharelado em Agrimensura.
- Bacharelado em Engenharia de Minas.
- Bacharelado em Engenharia Geológica.
- Bacharelado em Geologia.
- Licenciatura em Química.

SOBRE O MATERIAL

Os nossos materiais de estudos são elaborados pensando no perfil de nossos cursistas, contendo uma estruturação simples e clara, possibilitando uma leitura dinâmica e com volume de informações e conteúdos considerados básicos, mas fundamentais e essenciais para o desenvolvimento de cada disciplina. Lembrando que nossas apostilas não são os únicos meios de estudo.

Elas, juntamente com as videoaulas e outras mídias complementares, compõem os vários recursos midiáticos que são disponibilizados por nossa Instituição, afim de proporcionar subsídios suficientes a todos, no processo de ensino-aprendizagem durante o curso.

Divisão do Conteúdo

Este material está estruturado em três partes:

- 1) ABERTURA.
- 2) BASE TEÓRICA.

3) SESSÕES ESPECIAIS.

Parte 1 - ABERTURA

- Sobre a Instituição.
- Sobre o Curso.
- Sobre o Material.

Parte 2 – BASE TEÓRICA

- Conceitos.
- Observações.
- Exemplos.

Parte 3 – SESSÕES ESPECIAIS

- Mapa de Estudo.
- Síntese Direta.
- Momento Quiz.

Boxes

Além dessas três partes, no desenvolvimento da BASE TEÓRICA temos alguns BOXES interessantes, com intuito de tornar a leitura mais agradável, mesclando um estudo mais profundo e teórico com pausas pontuais atrativas, deixando a leitura do todo “mais leve” e interativa.

Os BOXES são:

- **VOCÊ SABIA?**



São informações complementares contextualizadas com a base teórica, contendo curiosidades que despertam a imaginação e incentivam a pesquisa.

- **PAUSA PARA REFLETIR...**



Um momento especial para descansar a mente do estudo teórico, conduzindo o cursista a levar seus pensamentos para uma frase, mensagem ou indagação subjetiva que leve a uma reflexão pessoal e motivacional para o seu cotidiano.

▪ SE LIGA NA CHARADA!



Se trata de um momento descontraído da leitura, com a apresentação de enigmas e indagações divertidas que favorecem não só a interação, mas também o pensamento e raciocínio lógico, podendo ser visto como um desafio para o leitor.

Base Teórica

INTRODUÇÃO

O tratamento de minérios é uma etapa essencial da mineração que tem como principal objetivo separar os minerais de interesse dos demais materiais que os acompanham na natureza. Esses materiais indesejados, chamados de ganga, são normalmente compostos por rochas e minerais sem valor econômico. O processo de tratamento busca, portanto, concentrar o minério útil, reduzindo o volume total e facilitando seu aproveitamento nas fases seguintes da cadeia produtiva.

Logo após a lavra, ou seja, a retirada do minério da jazida, o material bruto precisa ser preparado para o aproveitamento industrial. Isso é feito por meio de uma série de operações que envolvem técnicas físicas, químicas ou até físico-químicas. Cada tipo de minério exige um conjunto específico de etapas, que pode variar conforme suas características físicas (como densidade, dureza, granulometria) e propriedades químicas.

Além de melhorar a qualidade do produto final, o tratamento também tem importância ambiental e econômica. Ao reduzir a quantidade de rejeitos e resíduos, contribui para um aproveitamento mais eficiente dos recursos naturais e diminui os impactos associados ao descarte inadequado. Também permite que minérios de baixo teor sejam economicamente viáveis, tornando possível o aproveitamento de depósitos que, de outra forma, seriam considerados inviáveis.

Essa área do conhecimento é composta por diversos processos, entre eles a fragmentação, a classificação granulométrica, a concentração e, em alguns casos, o uso de métodos mais avançados como flotação ou hidrometalurgia. O entendimento desses processos é fundamental para quem atua ou deseja atuar na indústria mineral, especialmente no Brasil, que é um dos maiores produtores de minérios do mundo.

O domínio do tratamento de minérios permite não apenas o aumento da eficiência produtiva, mas também a adoção de práticas mais sustentáveis e tecnicamente adequadas, valorizando o profissional da mineração e contribuindo para o desenvolvimento do setor de forma responsável.

OBSERVAÇÕES:

O Brasil é um dos maiores produtores de minério de ferro do mundo. A maior parte desse minério não é enviada diretamente para a siderurgia — ele passa por processos de beneficiamento que elevam o teor de ferro de cerca de 45% para mais de 65%.

**VOCÊ SABIA?****O Brasil possui uma das maiores plantas de flotação do mundo**

A mina de cobre de Salobo, no Pará, operada pela Vale, possui uma das maiores e mais modernas plantas de flotação do mundo. Nela, o minério passa por diversas etapas de moagem e flotação em colunas gigantes, com capacidade de processar mais de 30 milhões de toneladas de minério por ano. Essa planta é referência internacional em eficiência e automação.

FRAGMENTAÇÃO E COMINUIÇÃO

A fragmentação do minério é uma das primeiras etapas realizadas após a lavra. Seu objetivo principal é reduzir o tamanho das partículas, tornando o material mais homogêneo e adequado para as etapas seguintes do tratamento. Esse processo é fundamental para liberar os minerais de interesse contidos nas rochas, o que aumenta significativamente a eficiência das operações de concentração e separação.

A fragmentação ocorre em duas fases principais: **britagem** e **moagem**. Ambas fazem parte do que chamamos de cominuição, termo técnico que designa o conjunto de operações responsáveis por reduzir o tamanho das partículas minerais por meio de forças mecânicas.

Britagem

A britagem é a primeira etapa da cominuição. Ela ocorre geralmente ainda próximo à frente de lavra ou na entrada da usina de beneficiamento. Nessa fase, os blocos de minério, que podem ter até mais de um metro de diâmetro, são quebrados em pedaços menores, geralmente entre 100 mm e 10 mm.

Tipos de britadores

Os britadores são os equipamentos responsáveis por essa operação. Eles aplicam forças de compressão ou impacto para quebrar a rocha. Os principais tipos de britadores são:

- **Britador de mandíbulas:** bastante utilizado na britagem primária, onde duas mandíbulas (uma fixa e uma móvel) comprimem o minério até quebrá-lo.
- **Britador cônico (ou giratório):** mais comum na britagem secundária. Ele possui um cone interno que gira dentro de um corpo fixo, promovendo a fragmentação contínua do material.
- **Britador de impacto:** utilizado quando se deseja uma fragmentação mais fina, empregando a força do impacto do minério contra placas metálicas.

Cada tipo tem vantagens e limitações e sua escolha depende do tipo de rocha, da capacidade de produção desejada e do estágio em que será aplicado.

Moagem

Depois da britagem, o material passa pela moagem, que é a etapa de fragmentação fina. A moagem visa reduzir o tamanho das partículas a frações de milímetro, o que é necessário para liberar totalmente os grãos de minerais úteis que ainda estão presos à ganga.

Equipamentos de moagem

Os moinhos são os equipamentos utilizados na moagem, e funcionam por impacto e abrasão entre bolas ou barras metálicas e o minério. Os principais tipos são:

- **Moinho de bolas:** cilindro que gira parcialmente cheio de bolas de aço. O atrito entre as bolas e o minério provoca a quebra do material.
- **Moinho de barras:** semelhante ao de bolas, mas utiliza barras de aço que se chocam contra o minério.
- **Moinho autógeno e semiautógeno:** utiliza o próprio minério como meio de moagem, sendo mais eficiente em certos tipos de material.

A escolha do tipo de moinho também depende das características do minério e da malha (granulometria) desejada para as etapas seguintes.

Eficiência da Cominuição

A cominuição é uma das operações mais intensivas em energia em toda a cadeia da mineração. Por isso, deve ser planejada com atenção, buscando o equilíbrio entre o grau de liberação dos minerais e o custo energético.

A eficiência desse processo está diretamente relacionada à capacidade de liberar os minerais sem gerar partículas muito finas (lamelas), que podem atrapalhar processos posteriores como a flotação. O controle da granulometria, por meio de peneiras ou hidrociclones, é essencial para otimizar o desempenho das operações seguintes.

Importância da Liberação Mineral

Um conceito fundamental ligado à cominuição é a **liberação mineral**, que se refere à separação física entre os minerais de interesse e os minerais sem valor econômico. Quanto maior a liberação, mais eficiente será o processo de concentração. Porém, isso precisa ser feito sem produzir partículas finíssimas em excesso, o que prejudica tanto a recuperação quanto o rendimento operacional.

OBSERVAÇÕES:

O controle da granulometria no processo de moagem é essencial: partículas muito finas aumentam o consumo de energia e podem prejudicar a flotação; já partículas muito grossas reduzem a liberação mineral.

EXEMPLOS:

Em uma usina de minério de ferro, blocos com até 1 metro de diâmetro são inicialmente quebrados por um britador de mandíbulas. Após essa etapa, o material é moído até atingir granulometrias inferiores a 0,1 mm em moinhos de bolas, para liberar as partículas de hematita.

**SE LIGA NA CHARADA!**

PERGUNTA: Por que o minério de ferro nunca se atrasa para o trabalho?

RESPOSTA: Porque ele sempre passa pela linha de produção!

PENEIRAMENTO E CLASSIFICAÇÃO

Após a cominuição, o material fragmentado apresenta uma ampla variedade de tamanhos de partículas. Essa mistura não é adequada para o prosseguimento direto às etapas de concentração, pois a eficiência dos processos de separação mineral depende de tamanhos relativamente uniformes. Assim, torna-se necessário aplicar técnicas que separem essas partículas de acordo com suas dimensões. Os dois métodos mais comuns para isso são o peneiramento e a classificação.

Peneiramento

O peneiramento é um processo mecânico de separação de partículas baseado exclusivamente no tamanho. Consiste em fazer com que o material passe por superfícies perfuradas ou telas metálicas com aberturas controladas. As partículas menores que os furos da tela atravessam o crivo, enquanto as maiores ficam retidas.

Esse processo pode ser feito a seco ou a úmido. O peneiramento a seco é geralmente utilizado quando o material apresenta baixa umidade e boa fluidez, o que evita entupimentos. Já o peneiramento a úmido é indicado quando o material é fino, possui alto teor de argilas ou tende a se aglomerar, sendo lavado com água para melhorar a eficiência da separação.

Os equipamentos utilizados variam desde peneiras manuais e vibratórias até peneiras rotativas e inclinadas, conforme a granulometria do material e o volume de produção. A escolha correta do tipo de peneira influencia diretamente a eficiência do processo e a qualidade do produto final.

Classificação

Enquanto o peneiramento utiliza aberturas físicas fixas, a classificação baseia-se no comportamento das partículas em meio fluido, normalmente água ou ar. Essa técnica aproveita diferenças de velocidade de sedimentação, forma, densidade ou inércia das partículas.

O método mais comum é a **classificação hidráulica**, onde as partículas são suspensas em água e separadas de acordo com o tempo que levam para sedimentar. As mais densas e maiores tendem a se depositar rapidamente, enquanto as menores ou mais leves permanecem em suspensão por mais tempo. Essa separação é especialmente útil antes de processos como a flotação, que exigem tamanhos de partículas controlados.

Entre os equipamentos mais utilizados para essa finalidade, destacam-se os classificadores espirais, hidrociclones e classificadores hidráulicos de sedimentação. Cada equipamento é escolhido com base nas características físicas do material e na precisão necessária para a separação.

Importância da Classificação Correta

Uma classificação eficaz garante que o material encaminhado para as etapas seguintes do beneficiamento mineral esteja dentro da faixa granulométrica ideal. Isso evita perdas no rendimento dos processos, desgastes excessivos nos equipamentos e retrabalho com materiais mal classificados.

Além disso, a boa separação contribui para o uso mais racional de água e energia, impactando positivamente tanto na eficiência quanto na sustentabilidade do processo industrial.

OBSERVAÇÕES:

A classificação em ciclones é amplamente usada em circuitos fechados de moagem. O material com partículas maiores que o desejado retorna ao moinho, otimizando o processo e reduzindo o desperdício de energia.

EXEMPLOS:

Em operações de lavagem de areia industrial, o peneiramento úmido é utilizado para separar os grãos finos e argilosos, melhorando a qualidade da areia para uso na construção civil ou em fundições.



VOCÊ SABIA?

A bateia é um método ancestral de concentração gravimétrica

A concentração gravimétrica não é uma técnica recente. Civilizações antigas, como os Incas e garimpeiros do século XIX, já usavam a bateia, um recipiente cônico manual, para separar ouro de sedimentos em rios. A diferença de densidade entre o ouro e a areia permitia a separação com

simples movimentos circulares — e o método ainda é utilizado por garimpeiros em pequenas escalas até hoje.

SEQUÊNCIA E FLUXOGRAMA DE OPERAÇÕES

O tratamento de minérios é composto por uma sucessão de operações unitárias que, juntas, formam um processo eficiente de separação e concentração do mineral de interesse. Para que essas operações funcionem de maneira coordenada, é essencial planejar a **sequência correta** das etapas e representar esse plano de forma visual e objetiva. É nesse contexto que se utiliza o **fluxograma de operações**.

O fluxograma é uma ferramenta gráfica que mostra, de maneira clara, como o minério percorre a usina de beneficiamento, desde sua entrada bruta até a obtenção do produto final. Ele permite visualizar as operações realizadas, os pontos de reciclo (retorno de material), as perdas em forma de rejeito e os produtos intermediários. Essa visão integrada é fundamental para a tomada de decisões, dimensionamento de equipamentos e controle de eficiência do processo.

Ordem das Operações

Embora cada usina de beneficiamento tenha características próprias, a maioria dos fluxos segue uma ordem básica de operações. Essa sequência pode variar conforme o tipo de minério, a tecnologia disponível e os objetivos do tratamento, mas normalmente inclui:

- **Cominuição:** redução do tamanho das partículas por britagem e moagem;
- **Classificação:** separação por tamanho das partículas.
- **Concentração:** separação do mineral útil da ganga, por métodos físicos ou físico-químicos;
- **Desaguamento:** remoção da água para facilitar o manuseio;
- **Disposição de rejeitos:** descarte do material sem valor comercial.

Entre essas operações principais, podem existir etapas intermediárias, como a reclassificação ou o recirculamento de material, que visam melhorar o desempenho global do sistema.

Representação Gráfica

O fluxograma é composto por símbolos padronizados que representam cada tipo de operação. Por exemplo, quadrados geralmente indicam operações de cominuição, retângulos representam peneiramentos ou classificações, e círculos ou losangos indicam tanques, espessadores ou outras unidades operacionais.

Além de facilitar a compreensão do processo, o fluxograma também é essencial para o **dimensionamento dos equipamentos**, pois permite calcular as vazões de entrada e saída em cada etapa, prever pontos de acúmulo, e simular alterações no circuito de beneficiamento.

Tipos de Fluxograma

Existem diversos tipos de fluxogramas utilizados na mineração, mas os mais comuns são:

- **Fluxograma de processo (ou de blocos)**: apresenta as operações principais de forma simplificada;
- **Fluxograma de engenharia (ou de detalhes)**: mostra, além das operações, os parâmetros operacionais, equipamentos e interligações;
- **Fluxograma operacional**: utilizado para treinar operadores e acompanhar a rotina das usinas, geralmente com linguagem mais acessível.

Importância do Fluxograma no Tratamento de Minérios

Ter um bom fluxograma é essencial para a gestão da usina. Ele serve como base para:

- Planejamento e controle da produção;

- Diagnóstico de falhas e gargalos no processo;
- Otimização de recursos (água, energia, reagentes);
- Treinamento de pessoal técnico e operacional;
- Suporte à engenharia de processo na tomada de decisões.

Além disso, fluxogramas bem elaborados são úteis para fins ambientais e legais, pois ajudam a documentar como os rejeitos são tratados e dispostos, contribuindo para a conformidade com normas ambientais.

OBSERVAÇÕES:

Alterações no fluxograma, como a adição de uma etapa de reclassificação, podem melhorar significativamente o rendimento e reduzir perdas de material valioso.

EXEMPLOS:

Um fluxograma típico de beneficiamento de ouro por flotação pode incluir: britagem primária → moagem → classificação → flotação → desaguamento → fundição do concentrado.



SE LIGA NA CHARADA!

PERGUNTA: O que um moinho disse para o minério teimoso?

RESPOSTA: “Você vai descer na marra, nem que seja na porrada!”

MÉTODOS FÍSICOS DE CONCENTRAÇÃO

A concentração de minérios é a etapa do tratamento responsável por separar de maneira eficiente os minerais de interesse dos minerais não aproveitáveis (ganga), utilizando

diferentes propriedades físicas. Diferente da metalurgia, que envolve transformações químicas, essa etapa busca **aumentar o teor do mineral útil** no material tratado apenas com base em características como densidade, magnetismo e condutividade elétrica. Esses métodos são amplamente utilizados na mineração por serem de aplicação simples, econômica e eficaz quando bem planejados. Eles constituem a base de diversos processos industriais e se adaptam a uma ampla variedade de minérios.

Concentração Gravimétrica

A concentração gravimétrica, também chamada de separação por densidade, baseia-se na diferença de peso específico entre os minerais. Minerais mais densos tendem a sedimentar mais rapidamente ou a ocupar posições inferiores quando submetidos a correntes de água ou vibrações, enquanto os menos densos são arrastados ou suspensos.

Esse método é amplamente utilizado na concentração de ouro, cassiterita (óxido de estanho) e outros minerais pesados. Entre os equipamentos mais usados estão:

- **Jigue:** aparelho que utiliza pulsos de água para agitar o leito de partículas, separando os materiais mais pesados na base e os mais leves na parte superior;
- **Mesa vibratória:** superfície inclinada e vibratória que favorece a separação de partículas com diferentes densidades por arraste;
- **Espiral concentradora:** tubo helicoidal onde partículas são separadas conforme a ação combinada da gravidade e do fluxo de água.

A concentração gravimétrica é vantajosa por dispensar o uso de reagentes químicos, o que reduz impactos ambientais e custos operacionais.

Concentração Magnética

Esse tipo de separação baseia-se na capacidade de alguns minerais serem atraídos por campos magnéticos. Minerais como magnetita, ilmenita e pirrotita apresentam resposta

magnética significativa e podem ser separados de minerais não magnéticos como quartzo e feldspato.

A separação magnética pode ser feita de duas formas:

- **Separação magnética de baixa intensidade:** adequada para minerais com forte magnetismo, como a magnetita;
- **Separação magnética de alta intensidade:** utilizada para minerais fracamente magnéticos ou paramagnéticos, como hematita.

Os separadores magnéticos podem operar a seco ou em meio úmido, e são amplamente empregados na concentração de minérios de ferro, areia monazítica e minerais industriais.

Concentração Eletrostática

A separação eletrostática explora as diferentes respostas dos minerais à eletricidade estática. Quando expostos a um campo elétrico de alta voltagem, alguns minerais tornam-se eletricamente carregados e são atraídos por eletrodos, enquanto outros permanecem neutros.

Esse método é especialmente útil para a separação de minerais condutores (como cassiterita, rutilo e grafita) de não condutores (como quartzo e silicato). É comum em processos de beneficiamento de areias minerais, por exemplo.

Apesar de menos comum do que os métodos anteriores, a separação eletrostática é importante quando se busca alta seletividade entre minerais com propriedades elétricas distintas.

Escolha do Método

A escolha do método físico de concentração depende de vários fatores:

- Propriedades físicas dos minerais presentes no minério;
- Granulometria do material;
- Teor do mineral útil;
- Custo e disponibilidade de equipamentos;
- Impacto ambiental e eficiência esperada.

Muitas vezes, mais de um método é aplicado em sequência ou em paralelo, de forma a maximizar a recuperação do mineral útil com o menor consumo de energia e insumos possível.

OBSERVAÇÕES:

A escolha do método de concentração depende tanto das propriedades dos minerais quanto da viabilidade econômica. Nem sempre o método mais eficiente tecnicamente é o mais viável financeiramente.

EXEMPLOS:

Em uma usina de minério de ferro, blocos com até 1 metro de diâmetro são inicialmente quebrados por um britador de mandíbulas. Após essa etapa, o material é moído até atingir granulometrias inferiores a 0,1 mm em moinhos de bolas, para liberar as partículas de hematita.

**PAUSA PARA REFLETIR...**

“Escolha um trabalho que você ame e não terá que trabalhar um único dia em sua vida.”

Confúcio.

FLOTAÇÃO

A flotação é um dos processos mais versáteis e amplamente utilizados no tratamento de minérios, especialmente quando os métodos puramente físicos não são suficientes para uma separação eficiente. Trata-se de um processo físico-químico baseado na diferença de afinidade das superfícies minerais com a água (hidrofilia) e com o ar (hidrofobicidade). Em outras palavras, alguns minerais têm tendência a se prender às bolhas de ar e flutuar, enquanto outros permanecem submersos na polpa.

Essa técnica é extremamente eficaz para minérios complexos, como os de cobre, chumbo, zinco, níquel e também para o beneficiamento de fosfatos, carvão e minérios oxidáveis.

Princípios da Flotação

O processo de flotação envolve a formação de uma suspensão aquosa (chamada polpa) onde são adicionados reagentes químicos que modificam seletivamente a superfície dos minerais. Em seguida, é insuflado ar no meio, formando bolhas que se prendem aos minerais hidrofóbicos. Essas partículas aderidas às bolhas ascendem até a superfície do tanque, formando uma espuma rica no mineral de interesse, que é então coletada. O restante da polpa, composta pela ganga, permanece no fundo e é descartado ou enviado para reprocessamento.

A seletividade do processo é garantida pelo uso de reagentes específicos que controlam quais minerais serão flutuados e quais permanecerão submersos.

Reagentes Utilizados

Existem três classes principais de reagentes utilizados na flotação:

- **Coletores:** tornam a superfície do mineral hidrofóbica. Um exemplo comum é o xantato, amplamente usado na flotação de sulfetos.

- **Espumantes:** controlam a formação e estabilidade da espuma. Entre eles, destaca-se o óleo de pinho e álcoois graxos.
- **Modificadores:** ajustam o pH do meio ou inibem a flotação de certos minerais. Incluem alcalinizantes, depressantes e ativadores.

A combinação desses reagentes é planejada conforme o tipo de minério e o comportamento dos minerais presentes.

Tipos de Células de Flotação

Os equipamentos onde ocorre o processo são chamados de células ou colunas de flotação. As **células mecânicas** são as mais comuns e funcionam com um rotor que agita a polpa e insufla ar. Já as **colunas de flotação** são estruturas verticais de grande altura, onde o ar é injetado pela base e a separação ocorre ao longo da coluna, resultando em melhor seletividade e menor consumo de reagentes.

Cada tipo de célula tem vantagens específicas, sendo escolhida conforme o tipo de minério, o grau de liberação e os objetivos do processo.

Vantagens e Limitações

A flotação oferece uma série de vantagens:

- Alta eficiência de separação para minérios complexos;
- Possibilidade de tratar partículas muito finas;
- Grande seletividade quando bem planejada.

No entanto, também apresenta algumas limitações:

- Necessidade de reagentes químicos, o que aumenta o custo e o impacto ambiental;

- Maior sensibilidade à variação da composição mineralógica da alimentação;
- Exige controle rigoroso de parâmetros como pH, tempo de residência e dosagem de reagentes.

Apesar disso, sua eficácia a torna indispensável em diversas operações industriais, sendo considerada uma das mais importantes inovações da engenharia mineral.

OBSERVAÇÕES:

O controle do pH é um dos fatores mais críticos na flotação. Um pH inadequado pode fazer com que o coletor não se fixe corretamente ou que a ganga também flutue, diminuindo a seletividade.

EXEMPLOS:

Na flotação de sulfetos de cobre, são usados xantatos como coletores. O minério é moído a uma granulometria fina, misturado com os reagentes e aerado. As partículas de cobre aderem às bolhas e são retiradas na espuma.



VOCÊ SABIA?

Alguns reagentes usados na flotação são derivados do óleo de pinho

Na flotação, um dos espumantes mais tradicionais é o óleo de pinho, um derivado vegetal obtido da destilação da resina de coníferas. Apesar dos avanços tecnológicos e do uso de espumantes sintéticos modernos, o óleo de pinho ainda é usado em muitas plantas por sua eficácia na formação de espumas estáveis e por seu custo acessível.

HIDROMETALURGIA

A hidrometalurgia é um conjunto de processos utilizados para extrair metais a partir de seus minérios ou concentrados por meio de soluções aquosas. Ao contrário das etapas anteriores, que envolvem a separação física dos minerais, a hidrometalurgia atua quimicamente, dissolvendo os metais presentes e recuperando-os em seguida por diferentes técnicas.

Esse tipo de processamento é especialmente vantajoso para minérios de baixo teor, rejeitos antigos, ou minerais que não respondem bem a métodos tradicionais como a flotação ou a separação gravimétrica. É comum seu uso na extração de ouro, cobre, zinco, níquel, urânio, entre outros.

Etapas da Hidrometalurgia

O processo hidrometalúrgico envolve três etapas principais:

a) Lixiviação

Nesta fase, o minério ou concentrado é tratado com uma solução química (como ácidos ou bases) que dissolve o metal desejado. Essa solução, chamada de lixiviado, contém o metal em forma solúvel.

A lixiviação pode ser feita de várias formas:

- **Lixiviação em pilha (heap leaching):** utilizada para grandes volumes de minério de baixo teor, empilhado sobre bases impermeabilizadas. A solução percola por gravidade, dissolvendo o metal.
- **Lixiviação em tanques agitados (agitated leaching):** realizada em reatores com agitação mecânica, proporcionando maior controle do processo e eficiência.
- **Lixiviação in situ:** aplicada diretamente na jazida, por injeção de solução química, geralmente em formações permeáveis.

b) Purificação ou concentração da solução

Após a lixiviação, o lixiviado contém diversos íons dissolvidos. Para separar o metal de interesse de outras impurezas, utilizam-se técnicas como troca iônica, extração por solventes ou precipitação seletiva. Essas etapas garantem uma solução mais concentrada e pura, adequada para a próxima fase.

c) Recuperação do metal

A etapa final consiste em recuperar o metal na forma metálica ou em composto de alto teor. Os métodos mais comuns são:

- **Precipitação química:** adição de reagentes que fazem o metal precipitar em forma sólida;
- **Eletrólise (eletrodeposição):** utilização de corrente elétrica para depositar o metal em eletrodos;
- **Cementação:** substituição iônica entre dois metais, como quando o ferro precipita cobre de uma solução.

Aplicações da Hidrometalurgia

A hidrometalurgia é amplamente utilizada para minérios refratários, ou seja, que não podem ser tratados eficazmente por processos tradicionais. É particularmente importante para:

- **Minérios de cobre oxidados** (como malaquita e azurita);
- **Minérios de ouro de baixo teor**, com cianetação como principal método;
- **Extração de urânio**, em que a lixiviação ácida é preferencial;

- **Minérios lateríticos de níquel e cobalto**, com processos de lixiviação sob alta pressão.

Além disso, esse método tem sido cada vez mais adotado na reciclagem de metais de resíduos eletrônicos e baterias, tornando-se uma alternativa relevante em termos de sustentabilidade.

Vantagens e Desvantagens

Vantagens:

- Menor consumo de energia em relação à pirometalurgia;
- Possibilidade de tratar minérios de baixo teor e materiais complexos;
- Operações contínuas e com maior controle dos parâmetros;
- Menor emissão de poluentes atmosféricos.

Desvantagens:

- Processos mais lentos, especialmente na lixiviação em pilha;
- Necessidade de controle rigoroso do pH e da química das soluções;
- Geração de resíduos líquidos (efluentes) que exigem tratamento adequado.

OBSERVAÇÕES:

A hidrometalurgia permite aproveitar materiais que seriam considerados rejeitos em processos convencionais, contribuindo para a sustentabilidade do setor.

EXEMPLOS:

A cianetação é o processo mais comum de lixiviação do ouro. O ouro é dissolvido por uma solução diluída de cianeto de sódio e depois recuperado por eletrólise ou precipitação com zinco.

BALANÇO DE MATERIAIS E GRAU DE RECUPERAÇÃO

O tratamento de minérios envolve movimentação constante de grandes volumes de materiais, com diferentes teores de minerais úteis e distintos estágios de processamento. Para avaliar a eficiência e o aproveitamento desses processos, é necessário aplicar conceitos quantitativos que permitam monitorar as entradas, saídas, perdas e rendimentos. Entre os mais importantes estão o **balanço de materiais** e o **grau de recuperação**.

Esses conceitos são amplamente utilizados em usinas de beneficiamento para controlar a produção, dimensionar equipamentos, identificar gargalos, otimizar etapas e garantir que os recursos minerais estejam sendo aproveitados de maneira eficiente.

Balanço de Materiais

O balanço de materiais, também chamado de **balanço de massa**, é uma ferramenta matemática que permite verificar se a massa total de materiais em uma determinada etapa ou circuito está sendo corretamente processada e distribuída entre os fluxos do sistema (alimentação, concentrado, rejeito, etc.).

De maneira geral, o princípio aplicado é o da **conservação de massa**:

$$\text{Alimentação (F)} = \text{Concentrado (C)} + \text{Rejeito (R)}$$

Além disso, é comum realizar o **balanço metalúrgico**, que leva em conta o teor do mineral útil em cada fluxo. Nesse caso, o material é acompanhado por meio da quantidade de metal presente em cada corrente, utilizando a fórmula:

$$F \cdot f = C \cdot c + R \cdot r$$

Onde:

- F: massa da alimentação
- C: massa do concentrado
- R: massa do rejeito
- f: teor do metal na alimentação
- c: teor do metal no concentrado
- r: teor do metal no rejeito

Essa equação é usada para determinar teores faltantes, rendimento de etapas e validar dados laboratoriais ou de planta.

Grau de Recuperação

O **grau de recuperação** representa a eficiência com que o mineral útil foi recuperado do minério original e direcionado ao concentrado. Ele é um dos indicadores mais importantes para avaliar a qualidade de um processo de concentração.

A fórmula básica é:

$$\text{Recuperação (\%)} = \frac{C \cdot c}{F \cdot f} \times 100$$

Essa expressão indica a proporção do metal presente na alimentação que foi efetivamente recuperado no produto final. Quanto maior esse valor, maior a eficiência da operação. No entanto, é importante lembrar que uma recuperação alta não significa, necessariamente, um produto de alta pureza — por isso, ela deve ser avaliada junto ao teor do concentrado.

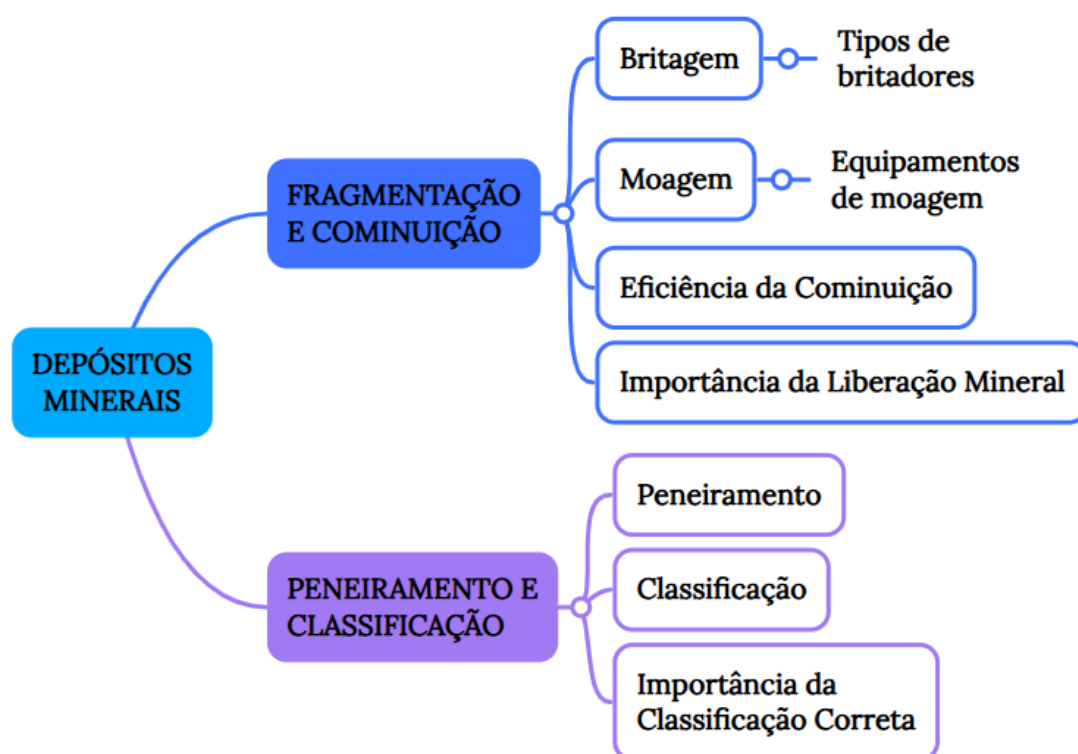
Importância Prática

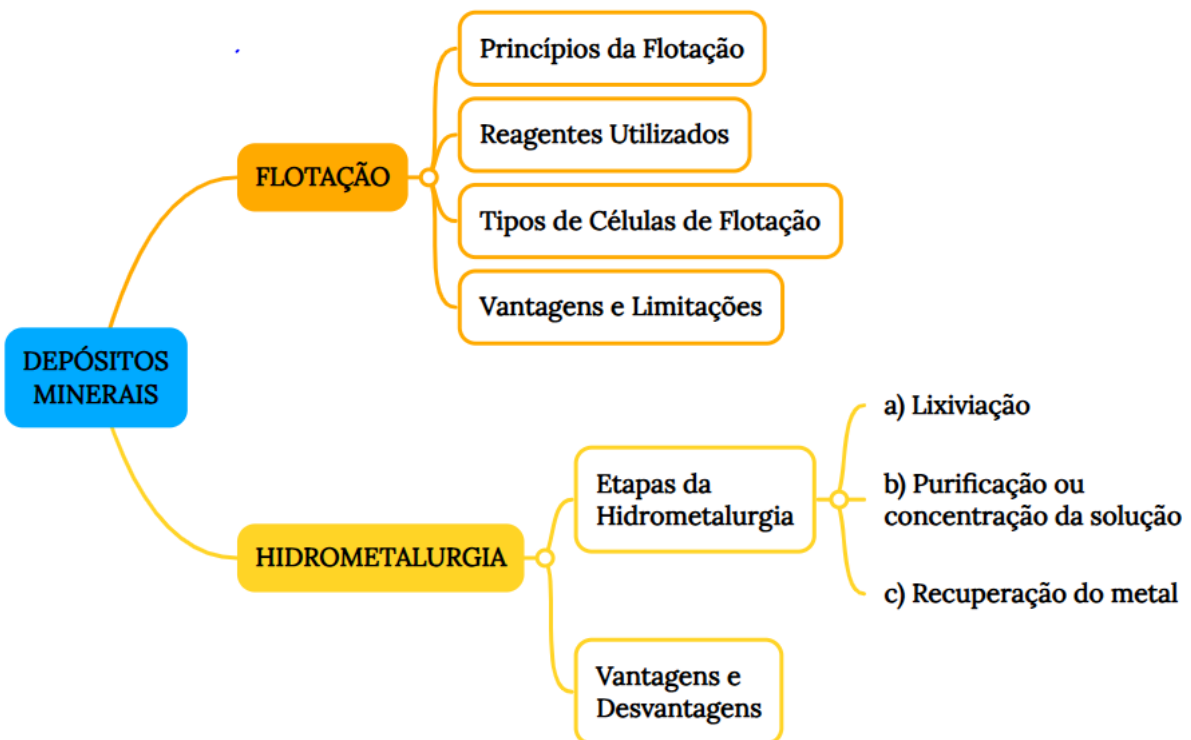
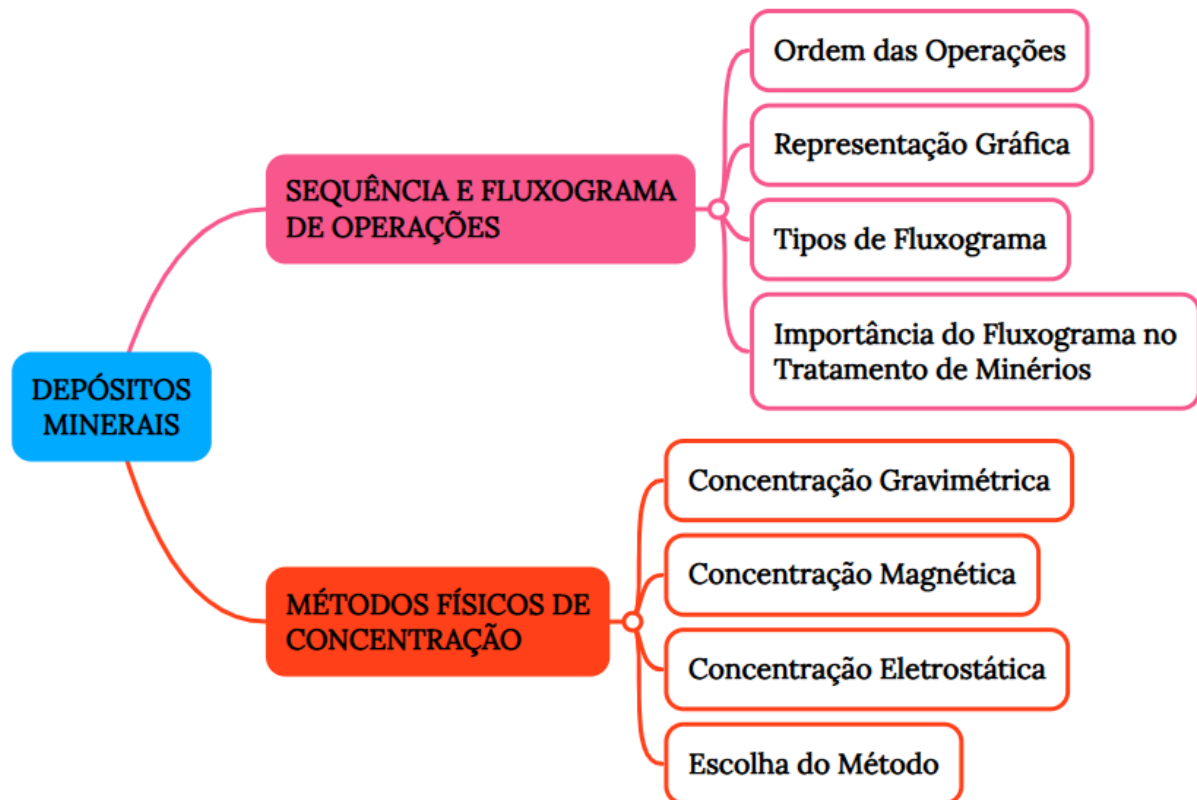
A realização contínua do balanço de massa e o monitoramento do grau de recuperação ajudam a:

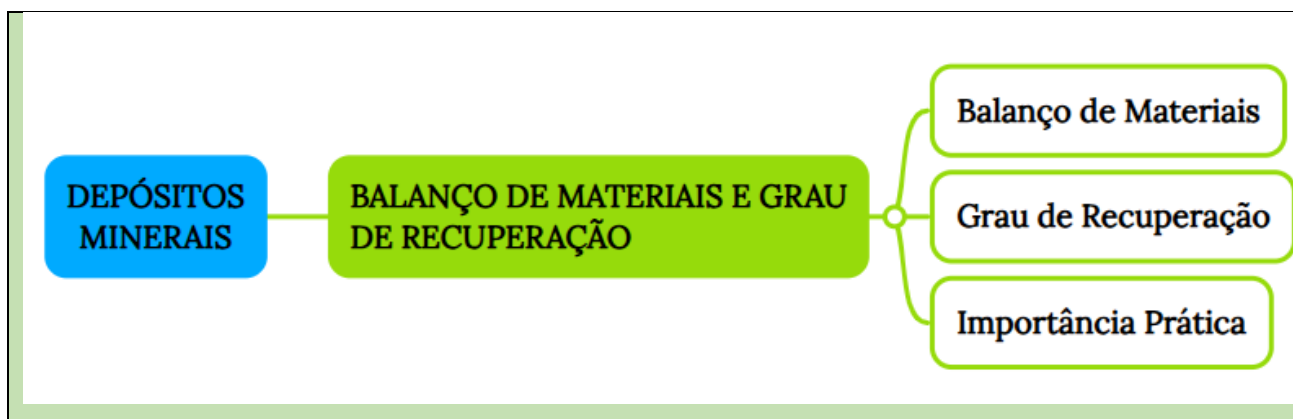
- Avaliar o desempenho da usina em tempo real;
- Identificar perdas de produto por falhas operacionais ou técnicas;
- Ajustar parâmetros operacionais como dosagem de reagentes, tempo de residência ou granulometria;
- Controlar a qualidade dos produtos gerados (concentrados e rejeitos);
- Atender exigências ambientais quanto à eficiência de uso dos recursos minerais.
- Esses indicadores são fundamentais não só para o controle técnico, mas também para a **viabilidade econômica do empreendimento**, pois permitem verificar se o minério está sendo aproveitado da melhor forma possível.

SESSÕES ESPECIAIS

MAPA DE ESTUDO







SÍNTESE DIRETA

INTRODUÇÃO AO TRATAMENTO DE MINÉRIOS

- O tratamento de minérios visa separar o mineral útil da ganga utilizando processos físicos ou físico-químicos.
- Não altera a composição química, apenas a concentração e o tamanho das partículas.
- É essencial para viabilizar economicamente jazidas de baixo teor e reduzir o impacto ambiental.

FRAGMENTAÇÃO E COMINUIÇÃO

- Fragmentação divide-se em **britagem** (fragmentação grosseira) e **moagem** (redução fina).
- Equipamentos principais: **britador de mandíbulas**, **britador cônico**, **moinho de bolas**, **moinho de barras**.
- Objetivo: liberar os minerais úteis da ganga e preparar o material para as etapas seguintes.
- A eficiência energética e a granulometria são fatores críticos nesta fase.

PENEIRAMENTO E CLASSIFICAÇÃO

- **Peneiramento**: separa partículas com base no tamanho utilizando telas ou peneiras (processo seco ou úmido).

- **Classificação:** separa partículas em meio fluido com base na sedimentação ou densidade (ex.: hidrociclones, classificadores espirais).
- Essencial para encaminhar o material na granulometria correta para as próximas etapas.

SEQUÊNCIA E FLUXOGRAMA DE OPERAÇÕES

- O beneficiamento segue uma ordem lógica: **cominuição** → **classificação** → **concentração** → **desaguamento** → **disposição de rejeitos**.
- O **fluxograma** representa essa sequência graficamente, sendo essencial para o planejamento e controle operacional.
- Tipos de fluxogramas: de processo, de engenharia e operacional.

MÉTODOS FÍSICOS DE CONCENTRAÇÃO

- Baseiam-se em propriedades físicas dos minerais (densidade, magnetismo, condutividade).
- **Gravimétrica:** separação por densidade (ex.: jigues, mesas vibratórias).
- **Magnética:** separação por resposta magnética (ex.: separadores de baixa e alta intensidade).
- **Eletrostática:** separação com base em condutividade elétrica.
- São simples, econômicos e de baixo impacto ambiental.

FLOTAÇÃO

- Processo físico-químico baseado na afinidade dos minerais com bolhas de ar.
- Utiliza reagentes: **coletores**, **espumantes** e **modificadores**.
- Aplicada em minérios complexos como sulfetos e fosfatos.
- Equipamentos principais: **células mecânicas** e **colunas de flotação**.

HIDROMETALURGIA

- Utiliza soluções aquosas para dissolver e recuperar metais (extração química).

- Etapas principais: **lixiviação, purificação da solução e recuperação do metal.**
- Métodos: cianetação, eletrólise, cementação, precipitação química.
- Aplicada em ouro, cobre oxidado, níquel laterítico, urânio e reciclagem de metais.

BALANÇO DE MATERIAIS E GRAU DE RECUPERAÇÃO

- **Balanço de massa:** avalia entradas e saídas da usina para controle de eficiência.
- **Grau de recuperação:** indica a proporção de mineral útil aproveitada.
- Essencial para medir o rendimento e justificar a viabilidade econômica do processo.

MOMENTO QUIZ

1. Qual das alternativas a seguir representa corretamente o objetivo principal do tratamento de minérios?

- a) Fundir o minério para obter o metal puro.
- b) Aumentar o teor do metal por meio da transformação química.
- c) Separar o mineral de interesse da ganga utilizando processos físicos ou físico-químicos.
- d) Classificar minérios de acordo com sua cor e origem.
- e) Reduzir os custos com transporte, sem alterar a composição do minério.

2. Em uma usina de beneficiamento, o minério passa por uma etapa de cominuição que reduz seu tamanho de 30 cm para 1 cm. Qual equipamento é mais adequado para essa operação?

- a) Moinho de bolas.
- b) Britador de mandíbulas.
- c) Hidrociclone.
- d) Mesa vibratória.
- e) Coluna de flotação.

3. A flotação é um processo amplamente utilizado no tratamento de minérios. Qual das alternativas a seguir está correta sobre esse método?

- a) Separa minerais com base apenas na diferença de densidade.
- b) Utiliza campos magnéticos para atrair os minerais úteis.
- c) Baseia-se na afinidade dos minerais com bolhas de ar, promovida por reagentes.
- d) Realiza a dissolução dos metais por meio de reações químicas com ácidos fortes.
- e) Só pode ser aplicada em minérios com granulometria acima de 5 mm.

4. Qual processo de concentração é ideal para separar minerais com diferentes comportamentos magnéticos, como magnetita e quartzo?

- a) Flotação.
- b) Concentração gravimétrica.
- c) Peneiramento.
- d) Concentração magnética.
- e) Hidrometalurgia.

5. Em uma usina, a alimentação apresenta 100 toneladas com 20% de cobre. O concentrado obtido tem 20 toneladas com 80% de cobre. Qual é o grau de recuperação do processo?

- a) 25%.
- b) 40%.
- c) 60%.
- d) 80%.
- e) 100%.

REFERÊNCIAS

QUESTÃO	ALTERNATIVA
1	C
2	B
3	C
4	D
5	E

GABARITO QUIZ

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. LUZ, Adão Benvindo; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Silvia Cristina Alves (Orgs.). Tratamento de minérios. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. 896 p. Disponível em: <https://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/476>. Acesso em: 05 maio 2025.

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral. LUZ, Adão Benvindo; FRANÇA, Silvia Cristina Alves; BRAGA, Paulo Fernando de Almeida (Orgs.). Tratamento de minérios. 6. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2018. 948 p. ISBN 978-85-82610-83-1. Disponível em: <https://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2172>. Acesso em: 05 maio 2025.

CHAVES, Arthur Pinto. Teoria e prática do tratamento de minérios. 2. ed. São Paulo: Signus, 2002.

WILLS, Barry Alan; NAPIER-MUNN, Tim J. Mineral processing technology: an introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery. 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Sumário Mineral. Brasília: DNPM, 2015.

EMBRAPA. LOPES, Sônia Assis et al. Recuperação de áreas mineradas. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2010. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/918036>. Acesso em: 05 maio 2025.



OBRIGADO!
CONTINUE ESTUDANDO.