

# Curso de Mineração - Básico

Módulo III: Beneficiamento Mineral







## Caro leitor,

Até o momento, você conheceu as atividades minerárias da Vale com foco no minério de ferro. Porém, sabemos que a Vale busca diversificar seu negócio, impulsionando sua capacidade de produção de outros recursos minerais, tais como o cobre e o carvão, ampliando seu portfólio.

Assim, para que você tenha uma compreensão ampla dos negócios da Vale, inauguramos um conjunto de módulos complementares, que começa pelo aprofundamento dos seus conhecimentos sobre o carvão.

Neste módulo complementar, você vai conhecer aspectos importantes sobre este recurso energético, não renovável, e de grande abundância no globo terrestre e a *commodity* mineral mais comercializada em todo mundo.

Além de ter a oportunidade de fazer uma viagem pela história do carvão, aqui, você vai entender melhor a produção do carvão no mundo, evidenciando que os níveis de reservas de carvão existentes são suficientes por mais de 200 anos.

Também vai se surpreender ao descobrir que o carvão, apesar de ser um recurso mineral, é composto por uma complexa mistura de componentes orgânicos e está presente no seu dia a dia. Como você poderá verificar essa presença? Você a conhecerá quando compreender a utilização do carvão térmico e do carvão metalúrgico.

Ainda neste módulo conhecerá as atitudes focadas em desenvolvimento sustentável através do investimento em tecnologias limpas, que têm tornado o uso do carvão cada vez mais seguro e relevante.

E ainda: nas próximas páginas, você será apresentado aos projetos de carvão da Vale em Moçambique, África (projeto Moatize), e diversos outros na Austrália. Todos esses empreendimentos representam um grande investimento na área do carvão para a Vale!

Esse módulo traz uma novidade em relação aos anteriores, as palavras do glossário estão assinaladas na primeira vez que aparecerem no texto.

**Boa leitura!**



# Sumário

## Introdução

O percurso do minério antes de entrar nas usinas



## Operações de interface mina-usina

O papel dos britadores

## Vargem Grande: o beneficiamento

Conheça a usina de beneficiamento



## Operações unitárias

Principais processos e equipamentos

## Introdução ao beneficiamento mineral

A importância desta etapa para a atividade mineradora

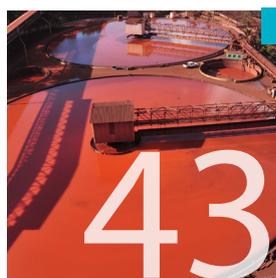


## Concentração

Saiba muito sobre as operações que permitem concentrar o minério

## Caracterização tecnológica

Os testes de laboratório



## Separação sólido-líquido

Principais processos e equipamentos

## Hidrometalurgia

Fique por dentro desta área do beneficiamento



## Operações auxiliares

O transporte na usina de beneficiamento



## O que vem por aí

O futuro do beneficiamento



## Balço de massas

A equação necessária para controlar os processos de concentração

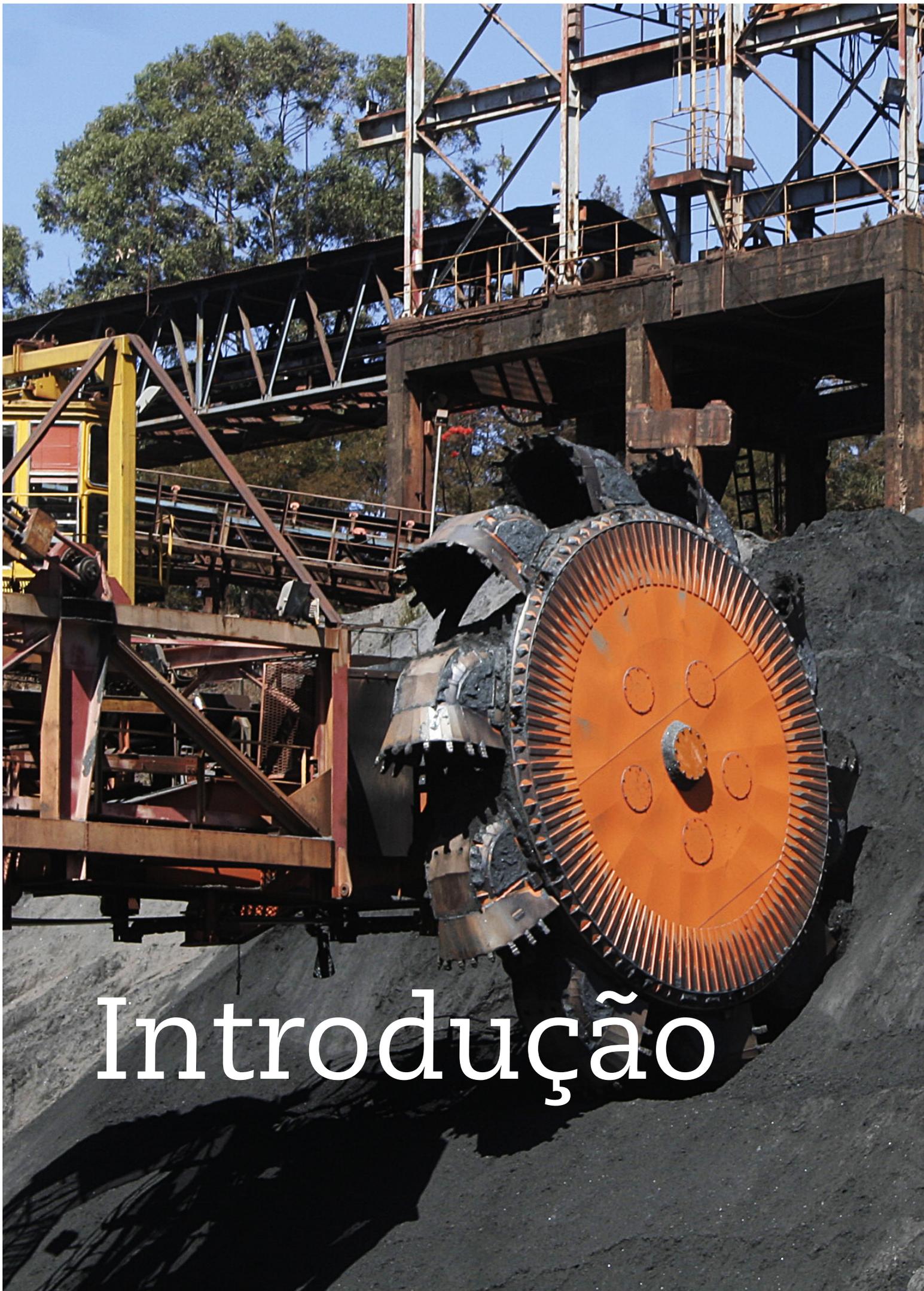


## Um pouco de história

O passado do beneficiamento

Atividades **60**

Glossário **64**



# Introdução

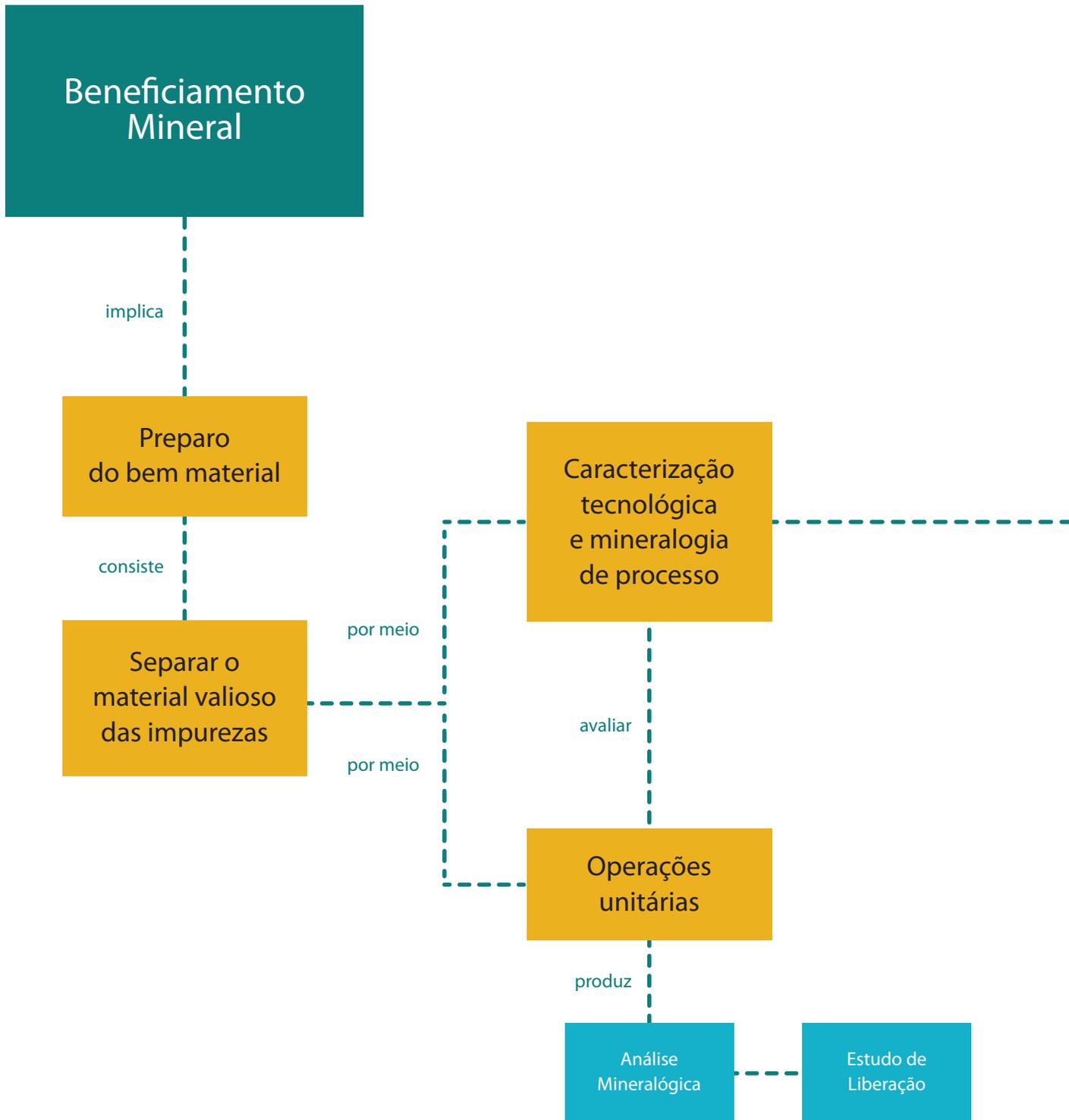


No terceiro módulo do Curso de Mineração Básico você vai fazer um percurso pelos processos de uma usina de beneficiamento e acompanhar as diversas etapas necessárias para reduzir as impurezas e, com isso, aumentar os teores dos minérios que interessam ao cliente, o metalurgista.

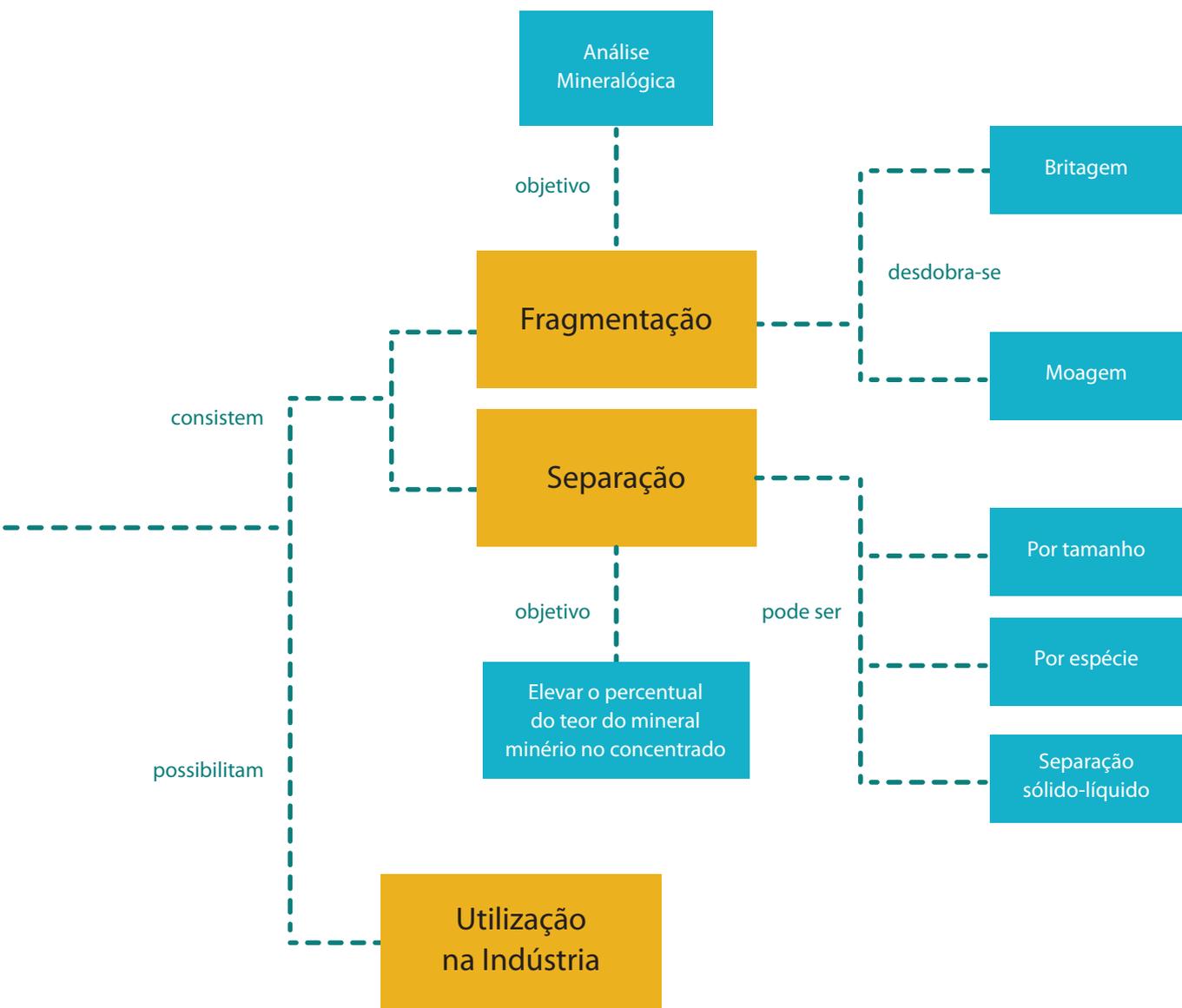
Ao longo deste módulo, você saberá como e por que o minério precisa ser reduzido de tamanho – antes de entrar nas usinas – e quais as principais operações que promovem a separação dos minerais, de acordo com suas características.

E mais: os principais conceitos sobre o funcionamento de cada equipamento utilizado nas mais variadas fases de uma unidade de beneficiamento.

Boa leitura!



# Mapa Conceitual



# Vargem Grande: o beneficiamento





# Conheça a usina de beneficiamento

“Nova Lima de rico metal, Terra do ouro de lúcido...”

Esse pequeno trecho do hino do município de Nova Lima – distante 15 km da capital Belo Horizonte – descreve um pouco de uma região que tem seu nome marcado na história da mineração em Minas Gerais. Uma ligação iniciada no século XVII, com a chegada do bandeirante paulista Domingos Rodrigues da Fonseca Leme, que lá se estabeleceu em busca de ouro. A partir daí, muitos outros mineradores migraram para o lugar, dando início a uma íntima relação entre aquelas terras e o universo da mineração.

As terras, ricas principalmente em minério de ferro, abrigam hoje uma das usinas de beneficiamento da Vale. Implantada em 2001, a unidade é integrante do Complexo Vargem Grande, que compreende, além da usina, o Terminal Ferroviário de Andaime e as minas de Abóboras, Capitão do Mato e Tamanduá. E é exatamente nas proximidades dessas duas últimas minas que está localizada a planta de beneficiamento.

Antes de ser transportado para a usina, o minério de ferro passa pelas operações de fragmentação – ou cominuição – (conheça cada uma delas a seguir) necessárias para deixá-lo do tamanho adequado aos processos de concentração ou, em alguns casos, como em Carajás, por exemplo, para ser entregue diretamente ao cliente. Na mina de Tamanduá, a granulometria do minério é reduzida na britagem primária. Já os processos

secundário e terciário de fragmentação são realizados na mina de Capitão do Mato.

O Complexo Vargem Grande compreende, além da usina, o Terminal Ferroviário de Andaime e as minas de Abóboras, Capitão do Mato e Tamanduá.

Depois de alcançado o tamanho ideal, o minério percorre oito quilômetros sobre uma correia transportadora, para chegar até a usina Vargem Grande. Nesta unidade, assim como em outras da Vale, há uma pilha de homogeneização: em um grande pátio, várias camadas de minério são dispostas umas em cima das outras. O objetivo é, como o próprio nome diz, homogeneizar a alimentação da usina.

Retomado da pilha de homogeneização, o minério de ferro segue para as etapas de peneiramento, classificação e ciclonação, que são formas de se separar os minérios de acordo com seus tamanhos, como você vai conhecer em detalhes neste curso. Diferentemente das minas de Cauê e Conceição, no Complexo de Itabira, e de Usina de Fábrica, todas em Minas Gerais, a usina do Complexo Vargem Grande não possui separação magnética, quando um minério de ferro é separado pelo seu grau de atração a um campo magnético, ou seja, a um ímã. A flotação é o método de concentração adotado no projeto para produção de *pellet feed*.



Correia transportadora



Visão externa da coluna da flotação

## A flotação de Vargem Grande

A espécie mineral que possui afinidade com água segue para o fundo da célula; já os hidrofóbicos – aqueles que não gostam de água – vão para a superfície de “carona” em bolhas de ar, formadas no interior da polpa.

Boa parte das operações da planta de Vargem Grande é controlada por modernos computadores, que utilizam *softwares* específicos, operados na sala de controle. Para retirar a água usada no tratamento do minério em forma de polpa, o material passa por mais um processo de separação, conhecido como desaguamento. É o caso de Vargem Grande, que emprega o método de espessamento. A polpa espessada, que contém o *pellet feed*, é bombeada para a usina de pelotização que integra o mesmo complexo. A água recuperada no processo (95%) volta para ser reutilizada, minimizando o consumo de água nova, captada dos mananciais da região.



Sala de controle Vargem Grande

# A produção de Vargem Grande

A usina de Vargem Grande recebe os minerais extraídos das minas de Tamanduá e Capitão do Mato e produz, anualmente, 20 milhões de toneladas de minério de ferro. O *pellet feed* é o carro-chefe, com alta qualidade química e física que constitui alimentação de uma usina de pelletização localizada no mesmo complexo. Todo o material processado na unidade segue, por meio de outra correia transportadora, para esse mesmo terminal. De lá, a maior parte do minério percorre, por ferrovia, mais 508 km até chegar ao Terminal Marítimo da Ilha Guaíba, em Mangaratiba, no Rio de Janeiro, de onde é exportado. A parte destinada ao mercado interno também é transportada por ferrovia até as usinas siderúrgicas, como Cosipa e Açominas.



Correia Transportadora - Terminal Ferroviário de Andaime



Terminal Ferroviário de Andaime



Terminal marítimo da Ilha Guaíba

# Indicadores-chave de desempenho

No Módulo II, você conheceu indicadores-chave de desempenho dos equipamentos utilizados nas operações de mina. Alguns deles são utilizados também na avaliação da produção das usinas de beneficiamento. Veja abaixo os dados da usina de Vargem Grande obtidos no ano de 2005:

- » Disponibilidade física: 86%
- » Utilização: 80,1%
- » Rendimento operacional: 68,8%

Recuperação de massa total (balanço de massas): 79% (este indicador descreve o percentual em peso dos produtos em relação à alimentação da usina).

## Principais produtos

Confira os principais minérios produzidos nas usinas de beneficiamento da Vale.

### Granulado

Material grosseiro peneirado a partir do ROM britado, em granulometria acima de 6,35 mm (¼ de polegada), sendo o tamanho máximo variável, usualmente menor que 50,0 mm.



### Sinter feed

Material na faixa granulométrica entre 6,35 mm e 0,150 mm. Para ser utilizado na siderurgia, o *sinter feed* é submetido a uma operação de aglomeração, na qual se forma o *sínter*, produto que alimenta o alto-forno e que você vai conhecer no próximo módulo. O *sinter feed* de Carajás é considerado uma referência mundial, com teor de ferro em torno de 65%, com baixos níveis de impurezas e boas propriedades metalúrgicas.



### Granulado

Material superfino, de faixa granulométrica entre 0,150 mm a 10 micrômetros. Tem teor de ferro na faixa de 67% a 68% e baixos níveis de impurezas. Para ser utilizado no alto-forno, o *pellet feed* tem de ser aglomerado em um processo chamado pelotização, que você irá conhecer no próximo módulo.



Fonte: Curso Descobrendo a Mineração/Vale.



# Introdução ao beneficiamento mineral



# A importância desta etapa para a atividade mineradora

No Módulo II, você conheceu todas as operações e os equipamentos necessários para a retirada do minério do subsolo. Mas, ao sair das profundezas da terra, ele ainda não está pronto para ser entregue ao cliente. Ainda terá que percorrer uma série de etapas e passar por diversos procedimentos que vão transformá-lo em um produto conforme as exigências do mercado, cada vez mais à procura de minérios adequados às suas indústrias de transformação. Quer um exemplo? Então, vamos voltar ao Módulo I e relembrar Carajás. Na mina do Sossego, o minério que a natureza oferece tem 1% de teor de cobre, um percentual considerado bom ao se levar em conta o que os solos de outras regiões são capazes de fornecer. No entanto, para as metalúrgicas, esse é um minério que exigiria um alto consumo de energia durante os seus variados processos industriais, medida que, obviamente, resultaria em despesas elevadas. Para viabilizar a comercialização desse produto, entra em campo mais uma fase da cadeia produtiva da mineração: o beneficiamento, um conjunto de operações unitárias que possibilita a utilização industrial dos bens minerais.

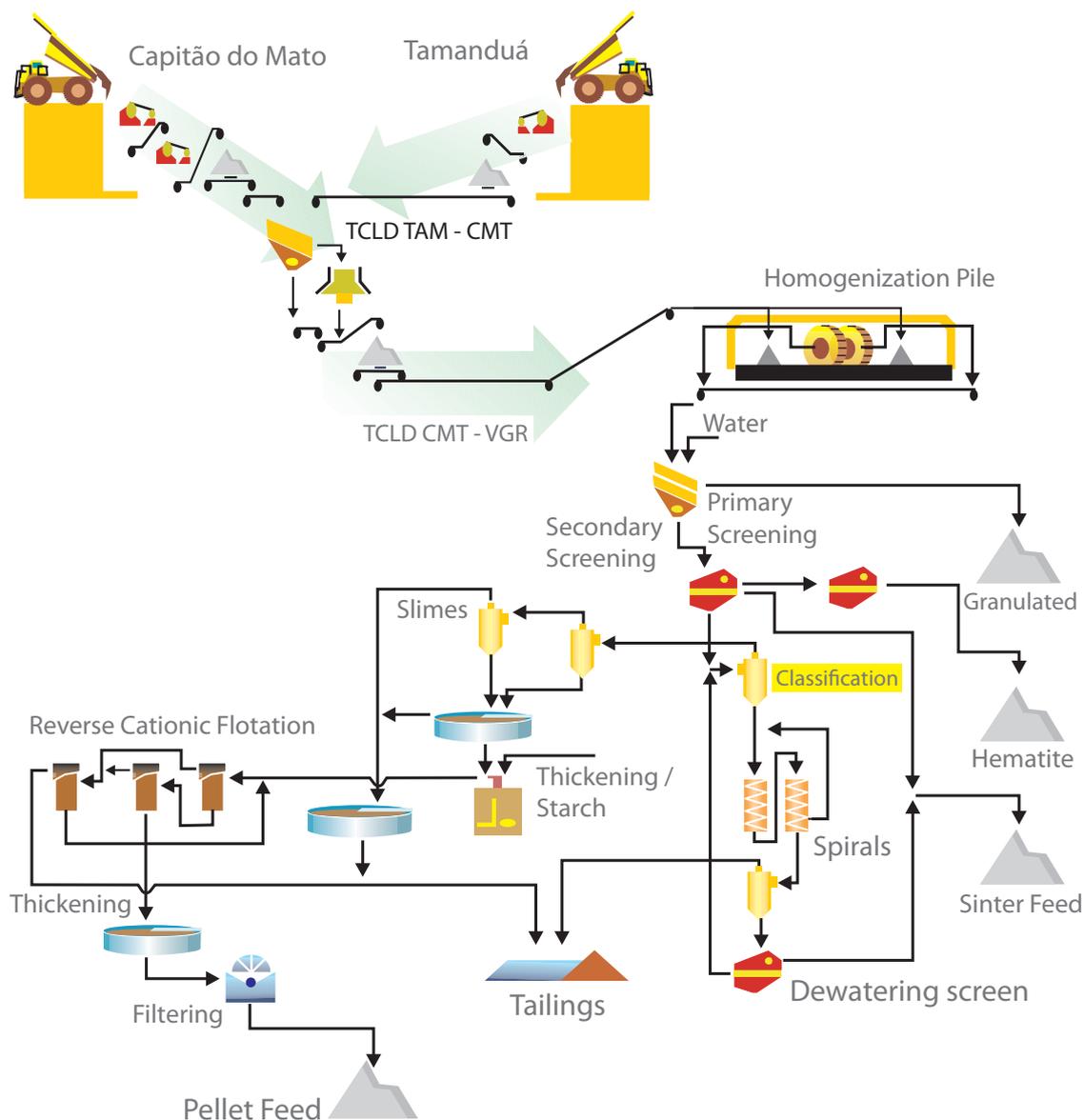
## Objetivo do beneficiamento

Ao conhecer o funcionamento de uma mina no Módulo II, você acompanhou também a trajetória do caminhão-fora-de-estrada e descobriu que a sua primeira parada – depois de ter a caçamba lotada de minério com o apoio da escavadeira – é no britador primário. A partir daí, tem início um conjunto de operações fundamentais no preparo do bem mineral para torná-lo adequado à sua utilização futura pelas indústrias metalúrgica e química, entre outras. O objetivo do beneficiamento é separar o material valioso, contido no mineral, daquilo que não tem utilidade: as impurezas, também chamadas de ganga no vocabulário da mineração. Além de promover essa “limpeza” no minério, máquinas e equipamentos entram em ação para deixá-lo com tamanho compatível com as demandas do mercado. Vamos, então, começar o nosso passeio pelos processos de beneficiamento.



Britador Quaternário

# Vargem Grande: Fluxograma de Beneficiamento de Minério





# Caracterização tecnológica



VALE

LABORATÓRIO DE CARACTERIZAÇÃO  
DE MATERIAIS

LABORATÓRIO DE PROPRIEDADES  
A ALTAS TEMPERATURAS

# Os testes de laboratório



Análise granulométrica utilizando o equipamento *Sedigraph*

Considerada o coração do beneficiamento, a caracterização fornece subsídios para a definição dos processos aos quais os minérios devem ser submetidos para possibilitar a sua utilização. Nesta etapa, estudos feitos em laboratório analisam, além do mineral valioso, os vários elementos que constituem a rocha, assim como a textura, a granulometria e a densidade do material, ou seja, as propriedades responsáveis pelo comportamento do minério ao passar pelos processos de beneficiamento.

As pesquisas permitem vislumbrar a evolução do trabalho que vem pela frente e, também, fazer a projeção dos equipamentos e das técnicas adequadas para tornar o minério livre das “companhias indesejadas”: impurezas ou outros minerais que não interessam ao processo. A caracterização é a chave para se conhecer a “intimidade” do minério. Ela é feita com base em amostras obtidas ainda durante a pesquisa geológica, a partir dos materiais colhidos nos métodos diretos de prospecção mostrados no Módulo II, como a sondagem, que utiliza os furos de sonda com broca de diamante.

A caracterização é a chave para se conhecer a “intimidade” do minério.

# Os principais parâmetros

## Análise granulométrica do minério

Avaliação da distribuição do tamanho das partículas do minério.

## Descrição qualitativa e quantitativa dos minerais presentes na rocha

Caracterização dos minerais componentes da rocha, como tamanho dos cristais, a textura e associações entre as partículas.

## Composição química do minério

Análise química elementar.

## Tamanho de liberação

Indica o tamanho ideal que o minério deve atingir para que possa ser concentrado.

## Índices de moabilidade

Indica o consumo de energia na moagem.



Granulômetro a laser *Malvern*



Filtração

# Análise mineralógica e caracterização tecnológica



## Lupa

Possui uma capacidade de aumento de até 80 vezes.

## Microscópio

Pode ser ótico ou eletrônico. O microscópio ótico tem uma capacidade de aumento de até 500 vezes e o eletrônico de até 100.000 vezes.



## Difratometria de raios-X

Utiliza-se um equipamento chamado difratômetro, que serve para identificar os minerais cristalinos.

## Separação em meio denso

Separam-se espécies leves das espécies pesadas utilizando um líquido que tem densidade intermediária entre as duas espécies.



## Determinação da moabilidade

Faz-se o estudo do consumo energético necessário para reduzir a granulometria do minério até alcançar o tamanho desejado

## Testes preliminares de bancada

Testes sucintos com equipamentos, em escala menor, que simulam os utilizados em escala industrial.





### Scale up

Processo que permite passar de uma escala de bancada – ou piloto – de desenvolvimento, em equipamentos de pequeno tamanho, para uma escala industrial. Por exemplo: para estudo do processo de flotação do cobre de Sossego, utilizou-se uma célula de bancada de 2,5 l. A célula industrial tem volume de 160 m<sup>3</sup>. Os parâmetros usados em escala de bancada tiveram que ser adaptados para uma escala muito maior.



Teste de flotação em escala de bancada

# Mineralogia aplicada

A análise mineralógica realiza pesquisas quantitativas e, principalmente, qualitativas, utilizadas nos estudos da caracterização tecnológica. O objetivo é identificar os minerais que compõem a rocha, avaliar as propriedades desses componentes, ver o tamanho das partículas minerais e como elas se associam umas às outras. Esse trabalho é feito com o apoio de uma lupa ou de um microscópio óptico ou eletrônico.



Microscopia eletrônica de varredura

# Estudo de liberação

Também realizado com o auxílio do microscópio, o estudo de liberação determina a redução de tamanho a que se deve chegar naquele determinado minério para que se obtenha o grau de liberação adequado e, assim, alcançar o resultado pretendido nas operações seguintes de concentração. Os estudos de liberação são feitos utilizando-se técnicas de contagem de partículas no microscópio, com avaliação visual das frações liberadas.

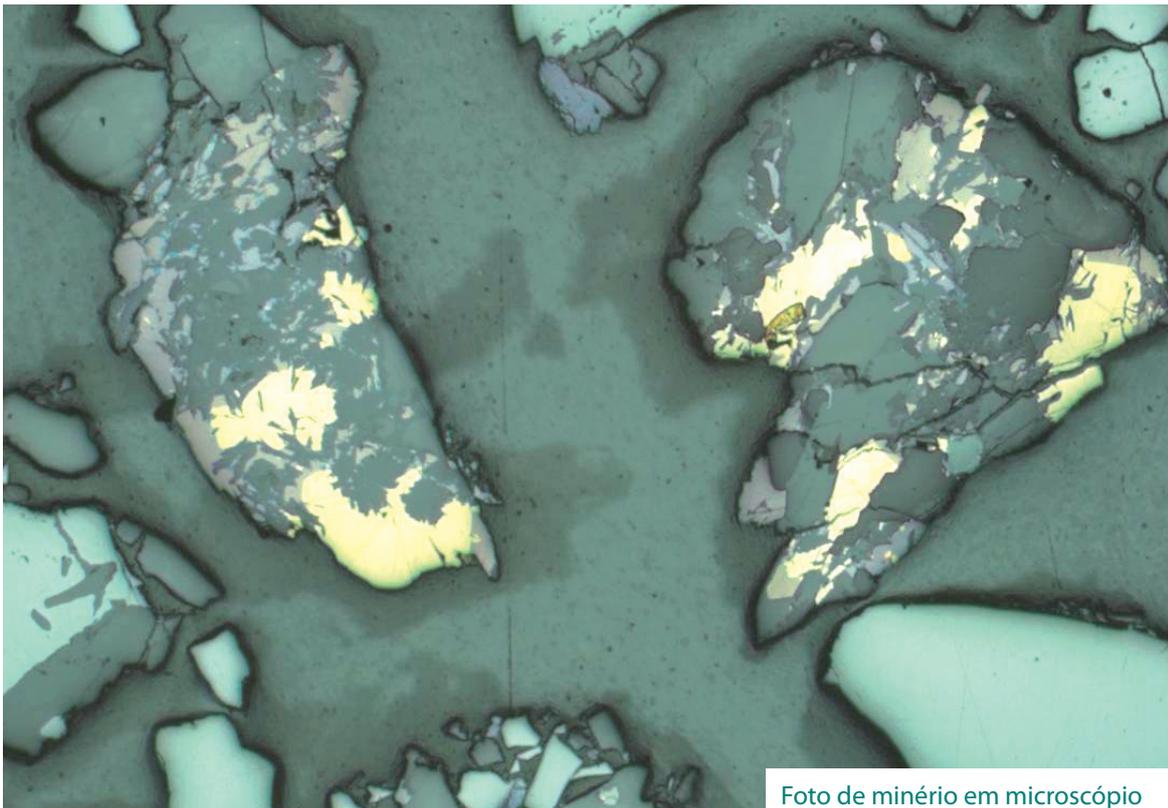


Foto de minério em microscópio



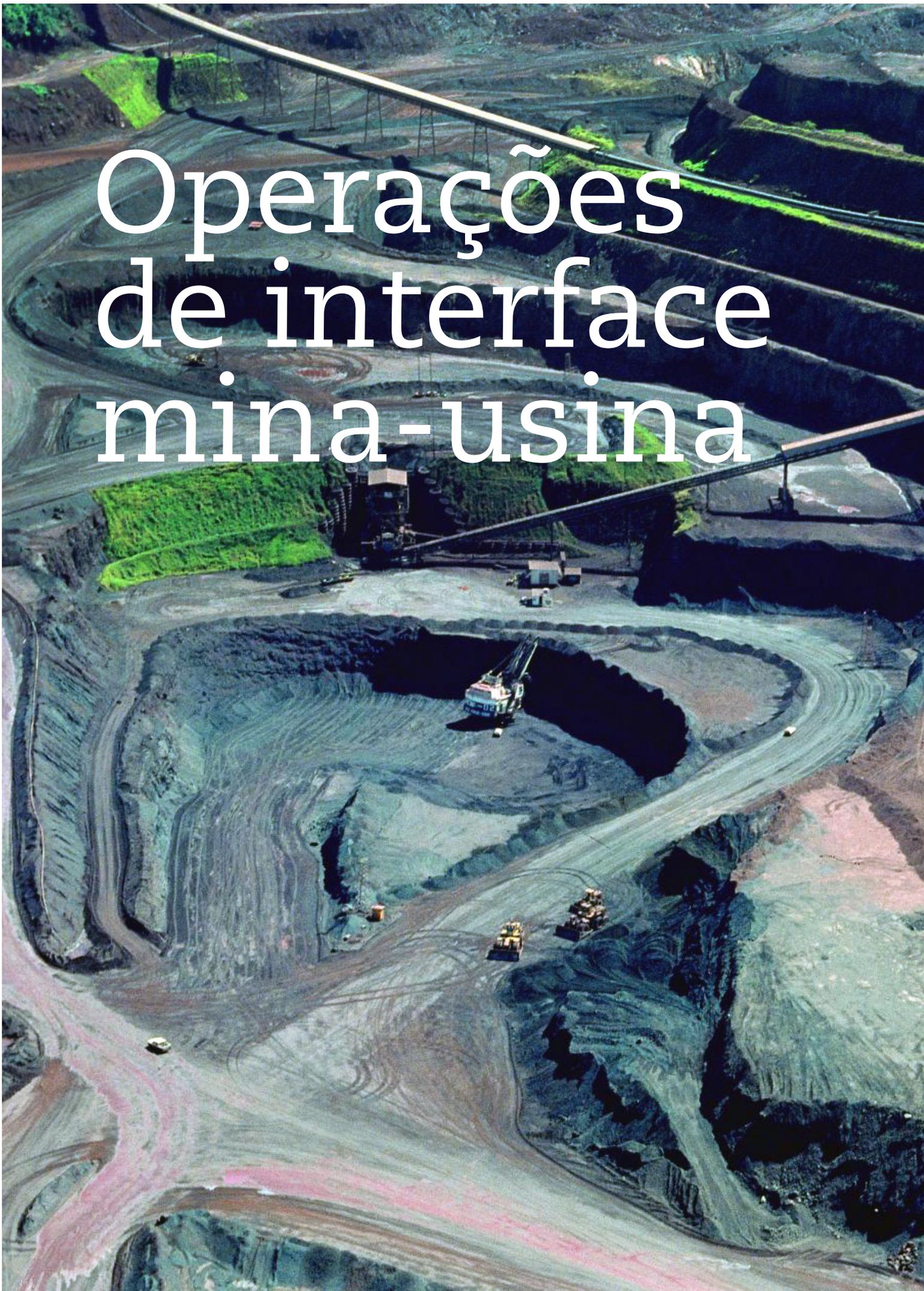
## Problema mineralógico

Com o auxílio da sondagem obtive uma rocha composta de hematita e quartzo. Qual o processo mais adequado para a concentração desse material, cujo tamanho de liberação é menor do que um milímetro?

Uma das possibilidades é a separação magnética. A hematita presente no minério de ferro tem média susceptibilidade magnética, propriedade que seu companheiro quartzo não possui. Nesse caso, o desafio do estudo de liberação é procurar o tamanho adequado de partículas que permita a separação dos componentes da rocha.



# Operações de interface mina-usina



# O papel dos britadores

A análise mineralógica realiza pesquisas quantitativas e, principalmente, qualitativas, utilizadas nos estudos da caracterização tecnológica. O objetivo é identificar os minerais que compõem a rocha, avaliar as propriedades desses componentes, ver o tamanho das partículas minerais e como elas se associam umas às outras. Esse trabalho é feito com o apoio de uma lupa ou de um microscópio ótico ou eletrônico.

Com o auxílio de equipamentos chamados britadores primários, o material bruto é reduzido ao tamanho adequado às especificidades da usina.



Britador cônico

# Operações unitárias





# Principais processos e equipamentos

As operações unitárias são etapas essenciais do fluxograma do beneficiamento mineral, constituído pela combinação adequada dessas operações. Os processos de beneficiamento mineral têm importância vital para a indústria de mineração, uma vez que constituem uma etapa, quase sempre, necessária para o aproveitamento dos minérios. Assim como numa orquestra sinfônica, quando os instrumentos são afinados isoladamente, as operações são avaliadas, ou mesmo testadas, separadamente. Em seguida, faz-se uma análise de todo o conjunto que constitui o fluxograma do beneficiamento. As operações possuem características próprias, cujo inter-relacionamento forma o beneficiamento. Essas operações unitárias são de duas naturezas distintas: fragmentação e separação. Em tempo: em alguns casos, os minérios podem passar por todas as etapas, ou até repetir um mesmo processo. Por exemplo: quando há necessidade de mais de uma etapa de fragmentação para atingir a granulometria desejada do material.

Os processos de beneficiamento mineral têm importância vital para a indústria de mineração.



Britador de mandíbulas

## Equipamentos usados na britagem primária

### Britador de Mandíbulas

É um equipamento com uma câmara, onde se dá a britagem. De um lado, há uma superfície metálica fixa e, do outro, uma superfície móvel. O material é descarregado na parte de cima, dentro da câmara e sofre o impacto do encontro entre a parte móvel e a fixa. Ao receber inúmeras “pancadas”, o mineral se quebra em várias outras partes.

### Britador Giratório

Esse equipamento possui uma superfície cônica, com a base voltada para cima. Dentro dele existe outra peça cônica que se movimenta. A segunda peça é responsável por empurrar o material contra a parede do equipamento. À medida que o material desce, passa por uma abertura cada vez menor, por se tratar de um cone invertido, fazendo com que ocorra um alto grau de fragmentação.



Peneiramento

## Equipamentos utilizados na moagem

**Moinho Autógeno:** a redução de tamanho acontece porque pedaços dos minérios entram em choque, uns com os outros. Os pedaços maiores quebram os menores, sob o impacto produzido.

**Moinho Semiautógeno:** reduz-se o tamanho dos corpos minerais, parte pelo próprio minério, parte por bolas metálicas.

**Moinho de bolas:** o impacto de esferas, normalmente de aço, com o minério promove a redução do tamanho.

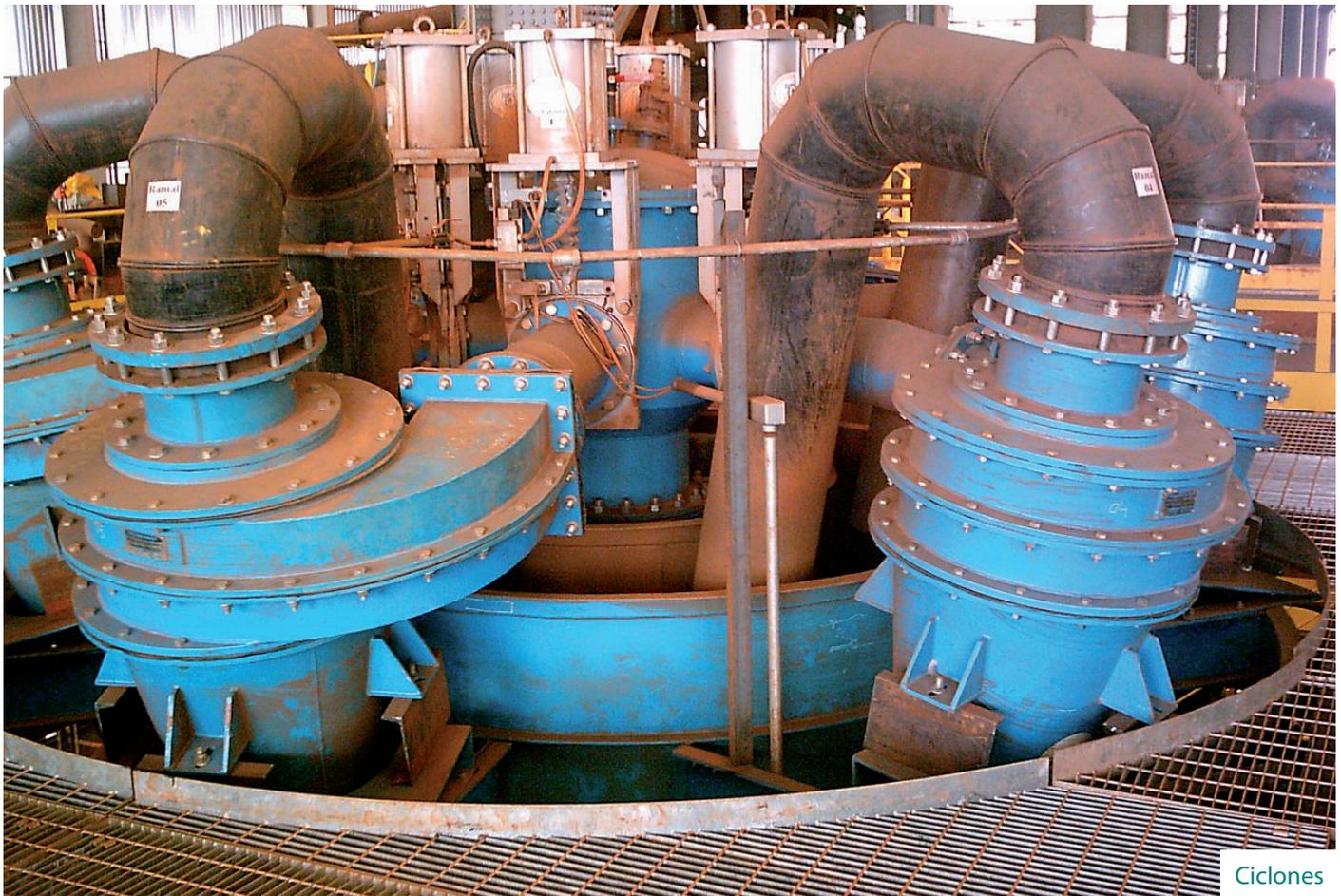
**Moinho de barras:** neste caso, a redução de tamanho é feita com hastes ou barras metálicas.

### Separação

Após passar pela fragmentação, o próximo passo do minério dentro de uma usina de beneficiamento é a separação, que pode ocorrer de três formas: por tamanho, por espécie e por fases (quando o minério é separado da água).

### Separação por tamanho: peneiramento e classificação

A separação por tamanho é feita para controlar as operações de fragmentação, seja na produção de partículas com tamanho adequado para o processo seguinte como, por exemplo, a concentração, seja para a obtenção de especificações de tamanho, exigidas para o produto final. Neste processo, o minério passa por operações de peneiramento, nas quais as partículas maiores que a abertura da tela da peneira ficam retidas e as menores passam por ela. A fração grossa é chamada, no jargão da mineração, de *oversize* e a fração fina de *undersize*. O material passante na tela da peneira, contendo os superfinos, é comumente submetido à operação de classificação, que separa as partículas por tamanho de acordo com o seu comportamento na água. As partículas pequenas e leves são mais lentas para sedimentar do que as grandes e densas. Geralmente, o controle da britagem é feito pelas operações de peneiramento e o controle da moagem pelas operações de classificação. Isso significa que o minério que não atingiu o tamanho adequado deve retornar para ser fragmentado mais uma vez, tanto na britagem quanto na moagem.



Ciclones

## Os principais equipamentos utilizados na classificação

### Ciclone

Equipamento que utiliza a força centrífuga para aumentar a velocidade de sedimentação das partículas sólidas. O ciclone constitui-se de um recipiente de forma tubular e cônica, onde o material mais grosso – e mais pesado – segue para as paredes e acaba saindo na abertura inferior do equipamento. Este fluxo é chamado, no jargão da mineração, de *underflow*. O material mais fino – e mais leve – é sugado para a região central e sai pela abertura superior, junto com a maior parte da água, razão pela qual é chamado de *overflow*.

### Classificador espiral

Trabalha com o princípio da velocidade terminal. As partículas maiores e mais pesadas afundam rapidamente e são removidas através de uma hélice (*underflow*). Já o material fino sai por transbordamento, pois, como sua velocidade de afundamento é baixa, ele acaba sendo arrastado e saindo junto com a água (*overflow*).



Classificador espiral

## Separação por espécie: concentração

Esta é a etapa mais importante do beneficiamento, pois possibilita o aproveitamento dos minérios de baixo teor, como o itabirito. O principal objetivo da concentração é separar as duas frações que compõem o minério, produzindo dois materiais: o valioso, chamado de concentrado, e o descartável, também conhecido como rejeito ou ganga. Os diferentes processos de concentração removem a maior parte dos minerais não valiosos, aumentando, assim, o teor do minério a ser fornecido às metalúrgicas.

A especificação química do minério de ferro é feita com base em %Fe, porém o mineral é o óxido de ferro. Por exemplo, 67% Fe significa 96%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . Os 3% restantes são impurezas, normalmente silicatos e água de hidratação das goethitas, outro óxido de ferro.

**Nota:**  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  é a fórmula da hematita.

## O que é rejeito de concentração de minério de ferro?

Nosso minério em questão é o itabirito.

Supondo que ocorra uma lavra de um minério com 50% de ferro, esse ainda não é um percentual adequado para ser levado para a siderurgia. Faz-se, então, uma concentração e produz-se um concentrado com 67% de teor. Entretanto, produz-se também um rejeito que ainda contém ferro. Hoje, já existem estudos para que, no futuro, uma nova tecnologia permita o aproveitamento econômico de parte desse rejeito. Daqui a alguns anos, o material, que hoje fica estocado numa barragem, talvez não seja tão rejeitado assim. Você vai saber mais sobre a política de resíduos da Vale no Módulo VI, que aborda, entre outros assuntos, a relação entre a mineração e o meio ambiente.



Barragem de rejeito de Brucutu



Mina de Brucutu



# Concentração



# Propriedades diferenciadoras

As diversas espécies minerais – valiosas ou não – possuem propriedades que auxiliam na separação dos minérios, que são estudadas na caracterização mineralógica e evidenciadas à medida que o material é submetido a determinados métodos de concentração. Para separação de pedras preciosas como o topázio, por exemplo, basta analisar a cor e o brilho do mineral. Já as partículas de minério de ferro acima de 0,15 mm e de, no máximo, 1 mm podem ser concentradas em um processo magnético. Abaixo desse tamanho, é comum o emprego da flotação. Na outra ponta, a dos minérios maiores, o método densitário torna-se o mais indicado. Veja a seguir os principais métodos e suas propriedades diferenciadoras.

## Métodos concentradores

### Catação manual

Utiliza a diferença de brilho, forma e cor entre os minerais. Exemplo: topázio.

### Método gravítico

Os que utilizam a densidade – ou peso específico – das partículas dos minerais como propriedade diferenciadora. As partículas são separadas pela ação da gravidade e também pela atuação da força centrífuga. Os principais equipamentos utilizados nesse processo são: calhas concentradoras, concentrador Reichert, mesas estáticas e oscilatórias, jigues, espirais e concentradores centrífugos.

### Separação magnética

A propriedade diferenciadora deste processo é a susceptibilidade magnética do mineral, ou seja, a capacidade de ser ou não atraído por um ímã. Quando submetidos a um campo magnético, os minerais fortemente atraídos são chamados de ferromagnéticos, como por exemplo, a magnetita. Em situação intermediária estão os paramagnéticos, minerais que necessitam ser expostos a um campo magnético de alta intensidade para serem atraídos, como é o caso das hematitas. No último lugar no pódio estão os diamagnéticos, minerais que não são atraídos pelo campo magnético, por exemplo, o quartzo.



Espiral Humphreys um dos equipamentos utilizados no método gravítico

### Flotação

A flotação explora as diferenças das propriedades das superfícies dos minerais. Veja mais no **box Flotação: conceitos e resultados**.

## Flotação: conceitos e resultados

A flotação é a técnica de concentração mais comum na indústria mineral. É amplamente aplicada para diversos minérios, tais como: cobre, fosfatos, ferro, potássio, entre outros. Este processo é realizado em meio aquoso, utilizando reagentes químicos, onde bolhas de ar ascendem passando através da polpa, em equipamentos denominados células de flotação.

A propriedade diferenciadora usada nesse processo é a molhabilidade da superfície dos sólidos. Essa propriedade indica a capacidade dos sólidos serem molhados por água ou não. Um exemplo bem comum de uma superfície hidrofóbica (que não se molha) é a da cera de uma vela de aniversário.

Existem poucos minerais que possuem sua superfície naturalmente hidrofóbica, como é o caso da grafita, que, por sua propriedade lubrificante, é usada, por exemplo, nas dobradiças metálicas. Os minerais são em sua maioria, naturalmente hidrofílicos, como é o caso do quartzo, hematita, calcopirita etc.

Para que um mineral-minério seja devidamente concentrado por flotação, torna-se necessário que sua superfície seja seletivamente recoberta com um reagente coletor, fazendo com que a sua hidrofobicidade seja induzida.

Em determinados casos, como na flotação do minério de ferro, há a necessidade de evitar que um dos minerais, que não se quer flotar, seja coletado juntamente com outro que se quer flotar. Neste caso utiliza-se um reagente depressor que tem a função de recobrir a superfície das partículas daquele mineral que não se quer flotar.

O mecanismo de concentração por flotação ocorre quando as bolhas de ar, subindo na polpa, colidem com as partículas de minério. As partículas predominantemente hidrofóbicas aderem à superfície das bolhas. As hidrofílicas permanecem no fundo do tanque. Esses agregados bolha-partícula aderidas são transportados para superfície do tanque, onde formam uma espuma que transborda para uma calha.

Como resultado do processo obtém-se dois produtos distintos, o mineral flotado, que foi capturado com a bolha de ar e o mineral afundado, ou não flotado, que é aquele que sedimentou no fundo da célula de flotação. Quando o material flotado é o produto desejado, a flotação é chamada “direta”, como é o caso do minério de cobre. Inversamente, se o material flotado é o rejeito, é chamada “reversa”, como é o caso do minério de ferro.

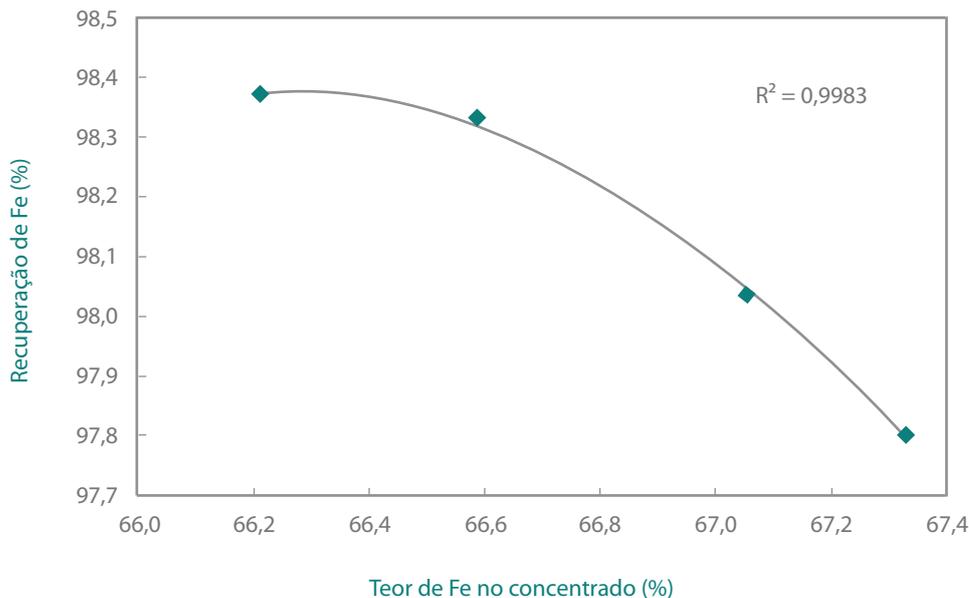


Separador magnético de alta intensidade

# Recuperação e pureza: conceitos fundamentais

Beneficiamento, recuperação metalúrgica e pureza são conceitos importantes. Enquanto a recuperação mede a quantidade de elemento valioso que se conseguiu obter no processo de concentração do minério, a pureza é medida pelo teor do elemento valioso presente no minério. Ao passar por várias fases para eliminar a ganga, o material valioso contido no minério também pode ser desperdiçado. O ideal é que a perda do material valioso seja relativamente baixa e, ao mesmo tempo, que se leve o mínimo de rejeitos para a metalurgia. Entretanto, a convivência entre os conceitos não é tão harmoniosa assim,

quase sempre o aumento de um prejudica o outro. A prática industrial demonstra que só se consegue aumentar a pureza de um concentrado sacrificando-se a quantidade de material valioso recuperado. A situação inversa também ocorre: só é possível recuperar uma quantidade maior de elemento valioso com a produção de um concentrado com teores mais baixos. O ponto de equilíbrio entre os dois parâmetros é a chave do processo de beneficiamento, fundamental para o aproveitamento econômico dos bens minerais.



## Minério rico

Em todo o mundo, Carajás é a maior mina que não necessita de concentração graças ao seu minério com um teor de ferro naturalmente rico. Como ela há apenas uma concorrente australiana. No entanto, o minério de Carajás é considerado de melhor qualidade do que o da sua concorrente. Em Carajás, a usina realiza a separação por tamanho para a adequação às exigências do mercado. Já no Sistema Sul, a maior parte do minério produzido exige concentração.





## Peneiramento em Umidade Natural (Carajás)

Motivada pela dificuldade de obtenção da qualidade física desejada (garantia de top size) em função das características do minério (muito coesivo), e, em função das tecnologias até então disponíveis, a Vale optou, em 1985, por um processo de classificação a úmido para o minério de Carajás.

Desenvolvimentos tecnológicos mais recentes motivaram a retomada dos estudos de peneiramento em umidade natural como uma rota alternativa no beneficiamento de minério de ferro de alto teor.

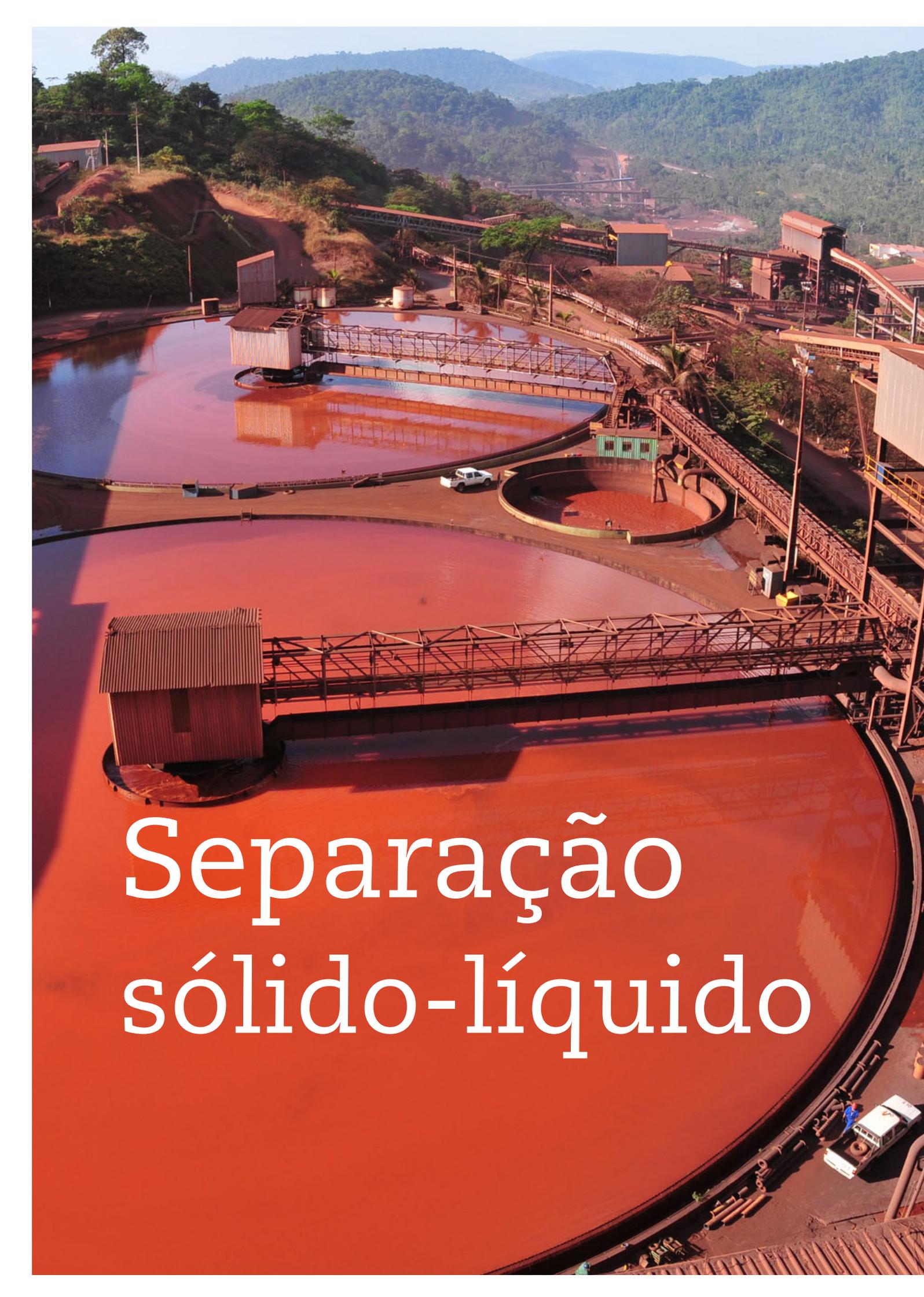
Seguindo seus valores e após uma intensificação nestes estudos, a Vale conseguiu desenvolver um processo de classificação em umidade natural do minério de ferro com a

capacidade de peneirar qualquer tipologia de minério, de diferentes frentes de lavra, em qualquer estação, seja seca ou chuvosa.

A implantação desta nova tecnologia contribuiu para a melhoria de aspectos relacionados ao impacto ambiental, na redução dos custos de instalação e operação, no aumento da recuperação em massa e da disponibilidade física do processo.

Essa tecnologia será aplicada em novos projetos de capital, como Adicional 40 Mtpa, S11D e Serra Leste.

*José Antônio Rodrigues*



# Separação sólido-líquido

# Processos e equipamentos

A presença da água é imprescindível para a execução da maioria das operações de beneficiamento, um bom exemplo, como você acabou de ver, é a flotação. As vantagens do tratamento em forma de polpa estão relacionadas a vários fatores como a não produção de poeira na movimentação do minério, a facilidade de transporte por meio de bombas, o baixo consumo de energia em alguns equipamentos e a maior eficiência da separação. Como o comprador espera receber um produto sólido, entra em cena, na usina de beneficiamento, mais uma operação de separação, encarregada pelo acabamento do concentrado, mais conhecida no dicionário “mineralês” como desaguamento. Na indústria mineral, essa operação é feita em uma ou em duas etapas: espessamento e filtração.

## Espessamento

Sabe aquele limpador de piscina dos clubes, que aspira o material sedimentado no fundo? O processo do espessamento segue o mesmo princípio: a decantação. A polpa de minério é colocada num recipiente – uma espécie de piscina gigante. Em Itabira, por exemplo, esse recipiente tem 100 metros de diâmetro – e deixa-se, então, o sólido decantar. Na parte de cima, apenas o líquido – com alguma turbidez – e na parte inferior o material sólido, a polpa espessada. O espessamento do concentrado é usado para a obtenção de polpas com maior percentual de sólidos, apropriadas para um processo posterior. No caso do concentrado, a etapa subsequente ao espessamento é a filtração. A água pode voltar para usina e realimentar o processo na concentração. A operação de espessamento também é usada para separar os rejeitos da água, permitindo a sua reciclagem.



Filtro a disco

## Filtração

Esta etapa pode ou não ocorrer após o espessamento. A aplicação desse processo depende, principalmente, da umidade que se pretende obter do produto. Coloca-se a polpa espessada numa superfície porosa, que retém o sólido e deixa passar o líquido. Você conhece o processo de filtração ao fazer café na cozinha? O minério seria a borra do café, só que seria retirado continuamente do filtro de pano.

As vantagens do tratamento em forma de polpa estão relacionadas a vários fatores, como redução da geração de poeira e aumento da eficiência dos processos de concentração.

A photograph of an industrial facility, likely a hydrometallurgical plant. The image shows a long, narrow structure supported by a complex metal scaffolding system. Along the length of the structure, there are four large, cylindrical tanks or vessels. Each tank has a white, circular cover or lid with a grid of small, grey, hexagonal fasteners around its perimeter. The tanks are connected to a network of pipes and valves. The overall scene is one of a large-scale industrial installation.

Hidrometalurgia



# Fique por dentro desta área do beneficiamento



Simulação da lixiviação em pilhas, utilizando colunas

Em alguns casos, os métodos físicos de concentração não são viáveis técnica ou economicamente. Não existem propriedades diferenciadoras eficazes que permitam um processo convencional de concentração, como aqueles que explicamos anteriormente. Exemplos são os minérios oxidados de cobre e níquel. Nestes, o método de obtenção do metal envolve inicialmente o uso de soluções aquosas ácidas ou alcalinas e é chamado de lixiviação. Uma reação química promove a dissolução preferencial dos minerais valiosos. Posteriormente, a solução contendo os metais dissolvidos é separada da parte sólida, é purificada e o metal é finalmente obtido por precipitação ou eletrodeposição. O processo de lixiviação se divide em lixiviação em pilhas, em tanques e em autoclaves.

## Lixiviação em pilhas

A lixiviação em pilhas é aplicada em minérios pobres ou rejeitos e consiste em se jogar uma solução química numa pilha de minério. O líquido vai percorrer toda a pilha e a solução resultante será recolhida na base. No caso dos minerais de cobre, o agente lixivante é uma solução de ácido sulfúrico diluída, que é aspergida em um minério depositado em pilhas. O ácido dissolve, principalmente, os minerais que contenham cobre, embora sempre se dissolva também um pouco de ferro, alumínio, manganês e outros metais, considerados impurezas na extração do cobre. A permeabilidade da pilha é um parâmetro importante do processo, assim como a concentração de ácido e a taxa de percolação, o deslocamento do líquido na pilha.

## Lixiviação de Níquel em Autoclave

A lixiviação é um processo de extração seletiva do metal contido no minério através da sua diluição em meio aquoso. No processo de extração do níquel em minérios oxidados, após a etapa prévia de cominuição, o minério, em forma de polpa, é alimentado em autoclaves, equipamentos que operam sob o mesmo princípio de uma panela de pressão.

Nesta operação, as autoclaves (reatores) trabalham em condições de alta temperatura, 250 graus centígrados, e pressão, 250 atmosferas, e o material alimentado é submetido à ação de um agente lixivante, ácido sulfúrico, que tem como função remover o metal de interesse do minério. Pelas características agressivas deste processo a tecnologia e o material (titânio) utilizado na fabricação das autoclaves se assemelham aos submarinos.

Como resultado deste processo, é produzida uma solução ácida, a qual passa por um processo de neutralização através da adição de um óxido básico. E em seguida passa por uma etapa de remoção do ferro e, por conseguinte a solução é submetida a estágios de decantação, onde se obtém um licor clarificado contendo níquel e cobalto.

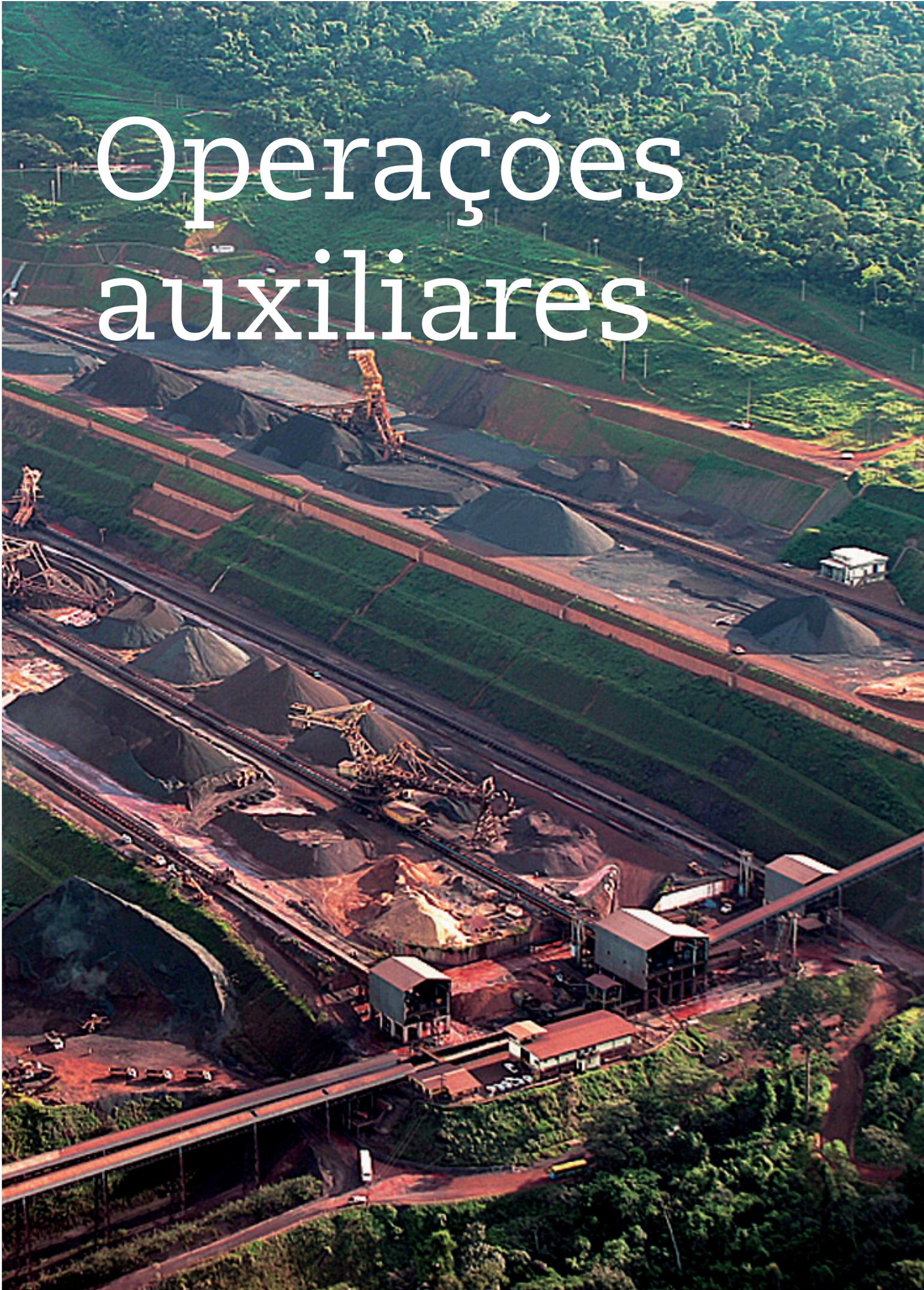
## Produção do metal

A partir do licor clarificado, a solução resultante contendo níquel e cobalto passa por um processo de concentração através de reagentes orgânicos, denominada “extração por solvente” (Solvent Extraction – SX), para a remoção e concentração do cobalto (subproduto). E por fim, a solução, livre de outros elementos metálicos, passa novamente por uma etapa de extração por solvente seguida de uma etapa de eletrodeposição com auxílio de uma corrente elétrica para a obtenção do níquel puro, na forma de uma placa metálica denominada de “níquel catodo”. Este estágio é conhecido como SX/EW (Solvent Extraction/Electrowinning). O preço da placa depende da qualidade (grau de pureza) do metal. A placa é comercializada na Bolsa de Londres, a LME (London Metal Exchange).

### Curiosidade

Esse processo está em um projeto em Southern Province, na Nova Caledônia, integrando o Sistema Ásia Pacífico da Vale e encontra-se em fase final de comissionamento. A Vale possui uma mina a céu aberto, com capacidade anual de produção de 60 mil toneladas de níquel e de 4.500 toneladas de cobalto, como um subproduto.

# Operações auxiliares



# O transporte na usina de beneficiamento

Em uma mina ou usina, o minério deve ser transportado de um local para outro, em forma de sólido ou em forma de polpa. O transporte de sólido seco ou com umidade natural é normalmente feito por correias transportadoras. Este é o caso, por exemplo, do transporte entre o britador e a pilha de homogeneização. Já o minério em polpa tem que ser transportado por meio de tubos e bombas centrífugas. Em Vargem Grande, por exemplo, o bombeamento é empregado na alimentação da ciclonagem e na flotação. O transporte por mineroduto é uma possibilidade considerada para longas distâncias, em substituição a ferrovia ou caminhões, para o caso de polpas de minério fino. Exemplo seria o transporte de *pellet feed* da Samarco, entre a usina localizada em Mariana, em Minas Gerais, e o Porto de Ubu, a 400 km, no Estado do Espírito Santo.

## Principais operações auxiliares e os equipamentos utilizados:

### Transporte de material sólido

Correias transportadoras.

### Transporte de minério em forma polpa

Bombas centrífugas.

### Estocagem e homogeneização em pilhas:

Empilhadeiras e retomadores de pilhas.

### Estocagem em silos:

Reservatório cilindro-cônico do qual o material é retirado com alimentador de correia ou sapatas.

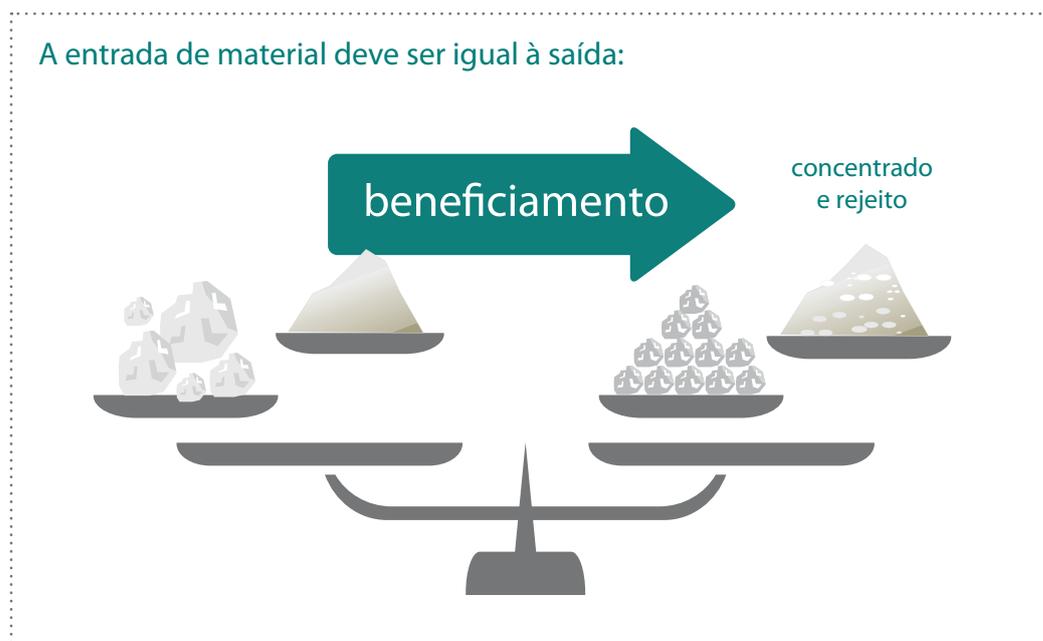
The image shows a complex industrial machine, likely a mass flow meter or balance, used for measuring the mass of materials. The machine is primarily grey and black, with a prominent red vertical component. It is situated under a corrugated metal roof. A yellow safety railing is visible in the foreground. To the right, there is a large orange control cabinet with various buttons and indicators. The background shows some greenery and a clear sky.

# Balanço de massas



# A equação necessária para controlar os processos de concentração

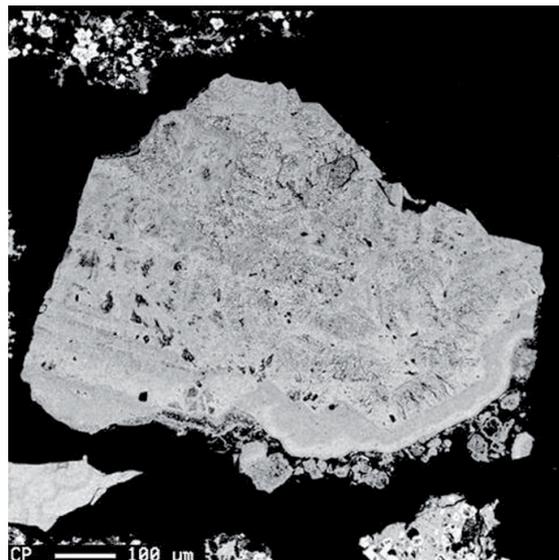
O principal controle de todas as operações da usina é feito por meio do balanço de massas, que consiste no estudo da distribuição das massas nos pontos de um circuito de beneficiamento onde há reunião ou repartição de fluxos. A equação é simples: a entrada de material deve ser igual à saída. Caso isso não ocorra, significa que houve acumulação ou perda de minério ao longo do processo. Podemos fazer uma analogia desse processo com um moedor de carnes, muito comum nos açougues. A quantidade que entra no triturador deve ser a mesma que sai, não pode haver acúmulo em nenhum ponto da máquina.





## Geometalurgia

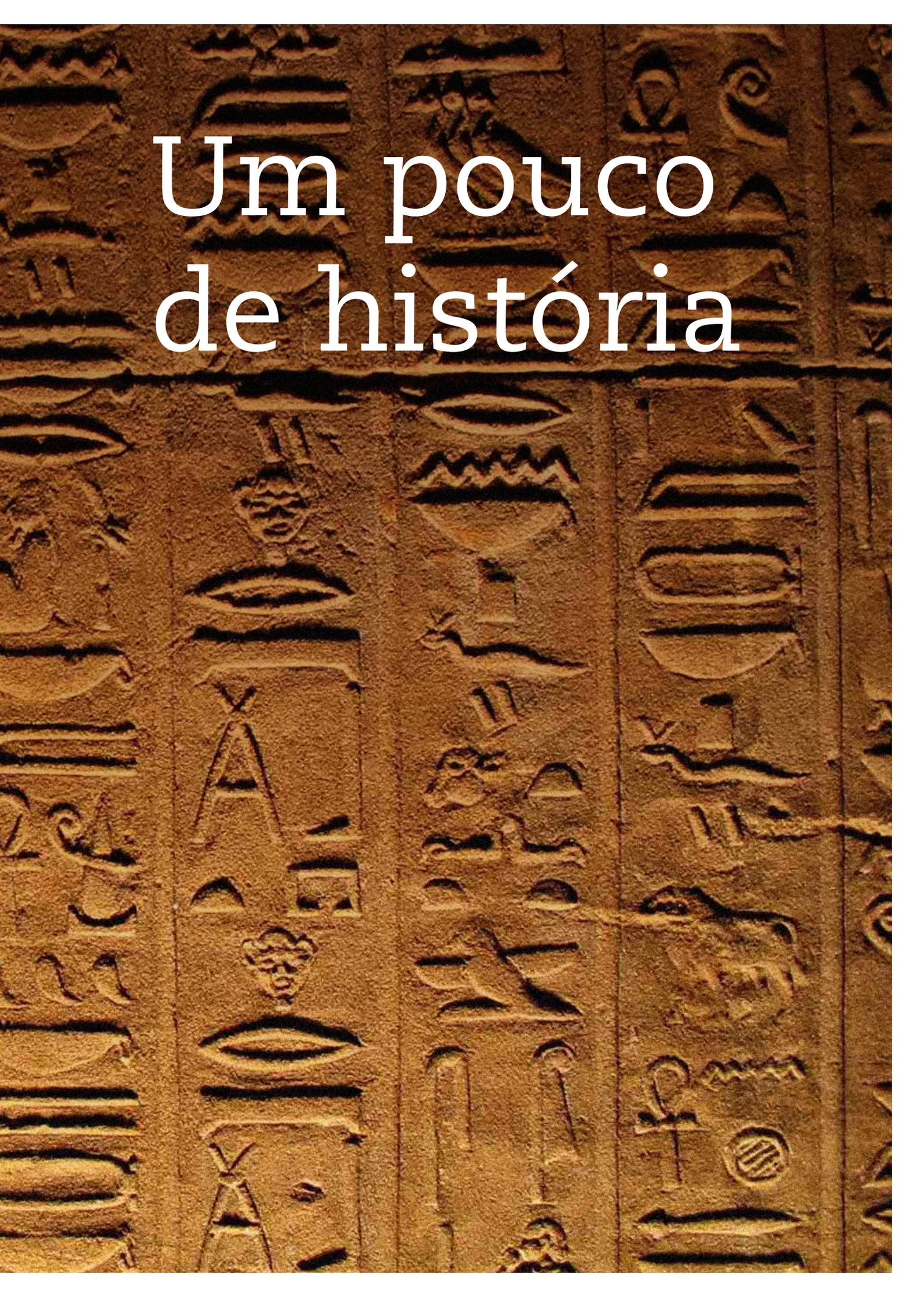
A geometalurgia é uma área que abrange diversos conhecimentos, integrando a pesquisa geológica do depósito mineral às áreas de mina, processamento, meio ambiente e mercado. A gênese do minério determina as suas características e estas, por sua vez, indicam o desempenho do minério no processo de beneficiamento, no processo do cliente etc. É como conhecer o potencial genético ou o DNA do bebê: a partir desse conhecimento é que se pode prever algumas características da criança antes até de seu nascimento. O objetivo é prever todos os comportamentos na cadeia produtiva a partir do minério *in situ* e, assim, reduzir os riscos do negócio.



Grão de goethita visto ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)



# Um pouco de história



# O passado do beneficiamento

A história registra: 400 anos antes de Cristo, os egípcios já tinham desenvolvido uma técnica para separar ouro de depósitos aluvionares. Em 1556, o livro publicado por Georgius Agrícola registrava outras técnicas de beneficiamento: a utilização de moinho tipo pilão movido à água, concentração gravítica – com base no peso dos elementos – através de calha e concentração em leito pulsante com o auxílio de peneira em forma de cesta. No século XVIII, a invenção da máquina a vapor e a consequente explosão da Revolução Industrial trouxeram novas necessidades para o uso mineral e outras possibilidades de beneficiamento.

Os saltos mais significativos nos processos de beneficiamento só ocorreriam entre o fim do século XIX o início do século XX. A utilização industrial da flotação, a partir de 1905, na Austrália, representou a inovação mais impactante. Nos anos seguintes, os avanços registrados estavam principalmente relacionados à criação de equipamentos maiores e mais produtivos (entre os anos 1940 e 1970), à melhoria de processos que utilizavam automação e à computação (anos 1970 e 1990). O choque do petróleo nos anos 1970 e o aumento súbito nos seu preço obrigaram a racionalização do uso de energia – isso também criou novas necessidades para o desenvolvimento dos processos de beneficiamento.

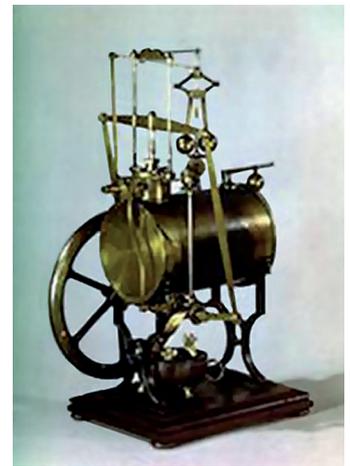


Coluna de flotação

A crise de energia no Brasil, em 2001, renovou a importância da busca por métodos mais econômicos para esses processos. Apesar dos grandes investimentos em pesquisa, visando um melhor entendimento dos fenômenos atuantes nas operações de beneficiamento, os avanços tecnológicos foram relativamente poucos. Houve, principalmente, evolução em processos já existentes. Na década de 60 a Vale só explorava o minério de alto teor, chamado hematita, sendo o itabirito, rejeitado. Aos poucos a hematita foi ficando escassa. A rejeição do itabirito era cara e ambientalmente impactante. Aos poucos a lavra de hematita foi ficando quase inviável. Naquela oportunidade um pequeno grupo de pesquisadores estudou um processo inovador, de âmbito mundial, de concentração da hematita e rejeição, do quartzo, que foi a separação magnética a alta intensidade e úmido – *Wet High Intensity Magnetic Separation*. Esse grupo formou o embrião do Centro de Pesquisas da Vale, atual CDM, localizado em Santa Luzia.



Georgius Agrícola



A evolução no processo de beneficiamento trouxe equipamentos maiores e mais produtivos.





## As inovações nos métodos de beneficiamento

A partir do século XIX, podemos destacar como principais inovações no tratamento de minérios:

- » Métodos de cominuição (fragmentação): moinho pilão, britador de rolos, britador de mandíbulas, britador giratório, moinho por bolas, moagem autógena, moinho de rolos de alta pressão.
- » Separação por tamanho e classificação: classificação mecânica, ciclone, peneira.
- » Concentração gravítica: mesa Wilfley, separação em meio denso estática, ciclone de meio denso, espiral de Humphreys, separador de meio denso Dynawhirpool, concentrador centrífugo.
- » Separação magnética e separação eletrostática: separador de baixa intensidade, separador magnético de alta intensidade, separador magnético de ímã permanente de terras raras.

## Os avanços na flotação

Os conceitos iniciais dos métodos de flotação foram estabelecidos em 1877, quando os irmãos Bessel conseguiram recuperar grafita com óleo. Já no início do século seguinte são registradas patentes de métodos que reduzem a utilização de óleo no processo – esse período marca o início da flotação moderna. Em 1975, o professor Paulo Abib Andery deu a contribuição brasileira para a evolução desse método, ao apresentar, no Congresso Internacional de Processamento Mineral, na Itália, um processo que permitiu o aproveitamento econômico do carbonato apatítico do Morro da Mina, em Cajati (SP) e depósitos similares.





O que  
vem por aí

# O futuro do beneficiamento

O futuro reserva novos desafios e alimenta expectativas quanto ao desenvolvimento de processos de beneficiamento. Os depósitos minerais ricos, fáceis de trabalhar, já foram esgotados. Os minérios são encontrados cada vez mais finos e mais pobres, o que exige maior esforço para permitir sua exploração econômica.

Já é corrente a tendência de aumento significativo das taxas de alimentação das usinas, o que levou a um aumento do porte dos equipamentos. Isso pode ser exemplificado no volume da célula de flotação. Enquanto a célula da usina de Cauê tem o volume de 17m<sup>3</sup> dispostos em bancos de 3 ou 4 células em série, hoje são usadas células unitárias de 160 m<sup>3</sup> no Sossego. Já existem em outras unidades da Vale células de 250 m<sup>3</sup>.

Os especialistas preveem uma intensificação do uso de recursos de informática e de tecnologias resultantes do desenvolvimento de novos materiais – por exemplo, imãs de terras raras e eletroímãs com supercondutores na separação magnética. Esperam também um uso intensivo da modelagem para controlar e interpretar os resultados experimentais. Serão mais comuns os sistemas automatizados para controle de processos via computadores e sensores.

Haverá, cada vez mais, a preocupação com a otimização, com o reaproveitamento da água e com o uso de equipamentos energeticamente mais eficientes. Novas tecnologias de deposição de rejeitos visarão à redução do impacto ambiental na mineração, atendendo à legislação ambiental cada dia mais restritiva.



Separador eletrostático

Os minérios são encontrados cada vez mais finos e mais pobres, o que exige maior esforço para permitir sua exploração econômica.

# Atividades

## Fluxograma Beneficiamento Mineral

Você viu que na usina de beneficiamento, o minério passa por vários processos até se transformar no produto que será entregue ao cliente. No fluxograma a seguir, há espaços para associar as imagens aos textos, através da numeração. Agora é a sua vez de organizar as etapas e partir para o próximo módulo.

A operação tem o objetivo de misturar os minérios ou produtos e torná-los homogêneos.



Pilha de Homogeneização

## Fragmentação



## Britagem



O mineral se quebra em várias partes ao sofrer impacto dentro da câmara, no encontro entre a parte móvel e a parte fixa.



O material é empurrado por uma peça, contra a parede do equipamento. Por ser um cone invertido, à medida que o material desce passa por uma abertura cada vez menor, ocorrendo, assim, um alto grau de fragmentação.

## Moagem

### Autógeno

Os minérios sofrem choques entre si, ocorrendo uma redução de tamanho.



Impactos entre esferas de aço e minerais promove a redução do material.

### Moagem de Barras

Barras metálicas e minerais sofrem impactos, o que reduz o tamanho do material.



Uso de equipamentos em escalas menores para avaliar como o minério deverá se comportar em escala industrial.

### Semi-autógena

Os corpos são reduzidos em parte pelo próprio minério e outra parte por bolas metálicas.

## Separação / Classificação

### Tamanho



Permite o controle da britagem, retornando a fração grossa para ser novamente fragmentada.



Operação que utiliza a força centrífuga para acelerar a velocidade de sedimentação das partículas sólidas. O material pesado sai na parte inferior do equipamento e o leve é sugado, e sai na parte superior.



Utiliza uma hélice para remover o material grosso que desce (princípio da velocidade terminal), enquanto o fino sai por transbordamento junto com a água.

## Espécie-Concentração



(equipamento: calhas concentradoras, concentrador Reichert, mesas estáticas e oscilatórias, jiges, espirais ou concentradores centrífugos). Utiliza a densidade ou peso específico das partículas dos minerais, que são separadas pela ação da gravidade e também pela atuação da força centrífuga.



Utiliza a susceptibilidade magnética do minério, que submetido a um campo magnético pode ou não ser atraído por um ímã, dependendo de sua condição.



Separa os minerais hidrofílicos dos hidrofóbicos, ou seja, separam-se de acordo com a sua afinidade com o líquido.

## Separação sólido-líquido



Processo que segue o princípio da decantação. A polpa é colocada num recipiente onde o sólido decanta, separando-se do líquido.



Etapa que ocorre ou não após o espessamento, dependendo da umidade que se pretende obter do produto. Nesse processo, a polpa espessada é colocada numa superfície porosa, que retém o sólido e deixa passar o líquido.



# Glossário

## Balanço de massas

É o estudo da distribuição ou repartição das massas (líquidos, sólidos e reagentes) nos pontos de reunião e/ou dispersão de fluxos num circuito de beneficiamento. Tem por fundamento o princípio da conservação da massa, descoberto por Lavoisier.

## Beneficiamento Mineral

É a etapa da atividade mineradora que se segue à Lavra do minério, com o objetivo de prepará-lo para a extração da substância valiosa nele contida (extração do metal, no caso dos minérios metálicos) ou produzir um produto final de valor comercial (no caso de minérios não metálicos ou carvão). Pode ser definido como o conjunto de operações unitárias necessárias ou convenientes para possibilitar a utilização industrial dos bens minerais.

Expressões de mesmo significado: Beneficiamento de Minérios; Tratamento de Minérios; Processamento de Minérios (ou de minerais).

## Bens Minerais

Massas minerais que se extraem da crosta terrestre em função da sua utilidade e valor. São os produtos da indústria de mineração.

## Britagem

É o primeiro estágio mecânico de cominuição de minérios. Reduz os tamanhos dos blocos ou partículas do minério lavrado até tamanhos adequados para a operação de moagem, quando esta é necessária.

## Caracterização tecnológica

É o levantamento das propriedades dos minérios (composição química, mineralógica, granulométrica, tamanho de liberação etc.) que são responsáveis pelo comportamento ou resposta destes quando submetidos aos processos do Beneficiamento Mineral.

## Ciclonação

É uma operação de classificação que utiliza a força centrífuga para acelerar a velocidade de sedimentação das partículas sólidas.

## Classificação

Método de separação de partículas sólidas em função do tamanho, com base na velocidade

(velocidade terminal) com que estas atravessam um meio fluido sob a ação da gravidade e/ou outras forças.

## Cominuição

É o mesmo que fragmentação. Redução de tamanho das partículas minerais.

## Concentração

Operação de separação das partículas em função da espécie mineral. Tem por objetivo separar as espécies minerais valiosas em um produto de valor comercial, chamado concentrado, daquelas não valiosas (ganga), num produto descartável chamado rejeito.

## Concentrado

Produto valioso da operação de concentração. Contém a maior parte do mineral valioso de um minério.

## Desaguamento

Processo de separação sólido-água.

## Espessamento

Processo de separação sólido-líquido por sedimentação.

## Filtragem

Processo de separação sólido-líquido no qual a polpa (suspensão de partículas sólidas em água) tem sua passagem forçada através de uma superfície porosa, que retém as partículas sólidas e permite a passagem do líquido.

## Flotação

Método de concentração que utiliza a hidrofobicidade das partículas como propriedade diferenciadora. Partículas hidrofóbicas (que apresentam maior afinidade pelo ar do que pela água) podem ser separadas daquelas hidrofílicas (que têm mais afinidade pela água que pelo ar).

## Fluxograma

Figura que representa a sequência das operações unitárias com o objetivo de obter o produto final.

**Ganga**

Minerais não aproveitáveis do minério.

**Geometalurgia**

Metodologia multidisciplinar que integra o conhecimento geológico do depósito mineral com as áreas de mina, processamento, meio ambiente e mercado, visando à redução do risco do negócio por meio de melhor previsibilidade nas operações e de qualidade dos produtos.

**Liberação**

É a produção de partículas constituídas por uma única espécie mineral (partículas livres), por meio de operações de cominuição (redução de tamanho), com o objetivo de possibilitar a separação física de espécies minerais diferentes (concentração).

**Lixiviação**

Extração, por dissolução em um líquido solvente, dos componentes solúveis de uma mistura de sólidos. A lixiviação é uma operação industrial de separação baseada na transferência de massa; um exemplo é a lavagem de um sal solúvel da superfície de um precipitado insolúvel. Na geoquímica, a lixiviação é a separação por dissolução dos constituintes solúveis de uma rocha ou corpo mineral pela percolação da água. Na mineração, a lixiviação é a separação por dissolução de minerais ou metais solúveis do minério pelo uso de líquidos percolantes, tais como soluções de cianeto ou de cloretos, ácidos ou água.

**Mineral**

Composto inorgânico natural, sólido, com composição química definida e propriedades físicas características (por exemplo, estrutura cristalina, cor, dureza, brilho, hábito, clivagem).

**Minério**

Qualquer substância mineral da qual se pode extrair economicamente um ou mais metais. Por facilidade de nomenclatura o termo é comumente utilizado para designar qualquer matéria prima mineral.

**Mineral-minério**

Mineral que contém o metal ou substância útil do minério.

**Moagem**

É o estágio final da cominuição, que reduz os tamanhos das partículas até os menores diâmetros exigidos para obtenção da liberação adequada.

**Operações unitárias**

São as operações individuais, realizadas em equipamentos específicos, tanto em escala piloto como industrial, que compõem um processo que vai dar origem a um produto final a partir de uma determinada matéria-prima.

**Partícula livre**

Partícula constituída por uma única espécie mineral.

**Partícula mista**

Partícula constituída por mais de uma espécie mineral.

**Polpa**

Mistura de sólidos particulados com água.

**Processo**

Combinação adequada de operações unitárias.

**Propriedade diferenciadora**

Propriedade utilizada numa operação de concentração como causa da separação física de espécies minerais diferentes.

**Recuperação mássica**

Mede a massa de concentrado que se consegue obter, por unidade de massa de minério alimentada no processo de concentração. Usualmente expressa em percentagem.

**Recuperação metálica ou metalúrgica**

Mede a quantidade de elemento valioso (metal) que se consegue obter no concentrado, em relação ao que havia inicialmente no minério. Usualmente expressa em percentagem.

**Rejeito**

Produto descartável da operação de concentração. Contém a maior parte dos minerais não valiosos de um minério (ganga).

**Teor**

Massa de um elemento ou substância pura, em relação à massa total do material considerado. Usualmente expresso em percentagem.

# Agradecimentos

Agradecimento especial para os especialistas da Vale que se dedicaram e contribuíram para a CONSTRUÇÃO do material em 2007:

## **Coordenação Técnica Geral**

Magid Wahib Saab

## **Coordenação Acadêmica Geral**

Fernando Gabriel da Silva Araujo

## **Módulo I**

Lilian Grabellos Barros de Moura

Paulo Henrique Matias

## **Módulo II**

Antonio Claret Antunes Campos

## **Módulo III**

Vania Lúcia de Lima Andrade

## **Módulo IV**

Magid Wahib Saab

## **Módulo V**

Arnaldo Soares da Silva

Fábio Costa Brasileiro da Silva

## **Módulo VI**

Ana Cristina Correa da Silva

Edna Pereira Nunes

Francisco Palhares Pereira

Mario Leopoldo de Pino Neto

Agradecimento especial para os especialistas da Vale que se dedicaram e contribuíram para a ATUALIZAÇÃO do material em 2009:

## **Módulo I**

Paulo Matias

## **Módulo II**

Leonardo Graça

Charles Faria

Daniel Chausson

Jordan Marinho

## **Módulo III**

Vania Lúcia de Lima Andrade

## **Módulo IV**

Magid Wahib Saab

## **Módulo V**

Arnaldo Soares da Silva

Fábio Costa Brasileiro da Silva

Fernando Mascarenhas

Francois Ferec (revisão)

Fabricio Salviato (revisão)

## **Módulo VI**

Ana Cristina Correa da Silva

Edna Pereira Nunes

Francisco Palhares Pereira

Marcelo Macedo

Mario Leopoldo de Pino Neto

Agradecimento especial para os professores do DEPEC/Fundação Gorgeix que contribuíram para a ATUALIZAÇÃO do material em 2009:

#### **Coordenação Acadêmica Geral**

Fernando Gabriel da Silva Araujo

#### **Módulo I**

Prof. Marcos Tadeu de Freitas Suita, PhD

Prof. Messias Gilmar de Menezes, PhD

#### **Módulo II**

Prof. Wilson Trigueiro de Sousa, PhD

#### **Módulo III**

Prof. Marco Antônio Rodrigues Drummond, M.Sc

#### **Módulo IV**

Prof. Paulo Santos Assis, PhD

Prof. Paulo vonKrüger

Prof. Eloísio Queiroz Pena, M.Sc

Prof. Cláudio Batista Vieira, PhD

Prof. Fernando Gabriel da Silva Araújo, PhD

#### **Módulo V**

Prof. João Esmeraldo da Silva, PhD

Edimar Costa Westin, Eng.

#### **Módulo VI**

Prof. Hernani Mota de Lima, PhD

Prof. Valdir Costa e Silva, PhD

Prof. Jorge Luiz Brescia Murta, M.Sc.

Agradecimento especial para os especialistas da Vale que se dedicaram e contribuíram para a ATUALIZAÇÃO do material em 2012:

#### **Módulo I**

George Liu

#### **Módulo II**

Kioshi Kaneko

Leonardo Gravina

Daniel Chausson

Walter Mazon

Paulo Freitas

Charles Faria

Fleming Simões

#### **Módulo III**

Vania Lúcia de Lima Andrade

Marcus Alexandre Carvalho

#### **Módulo IV**

José Carlos Pontes

Austregésilo Guimarães

Washington Mafra

Hamilton Pimenta

#### **Módulo V**

Marcos Borjaille

Ricardo Penna

Daniel Marim

Junio Amorim

#### **Módulo VI**

Gabriel Ribeiro

Daniela Dolabela Corrêa

#### **Saúde e Segurança**

Leonardo Dias Pinto

Agradecimento especial para os professores da UFOP que contribuíram para a ATUALIZAÇÃO do material em 2012:

**Coordenação Acadêmica Geral**

Fernando Gabriel da Silva Araujo

**Módulo I**

Prof. Messias Gilmar de Menezes, PhD

**Módulo II**

Prof. Wilson Trigueiro de Sousa, PhD

**Módulo III**

Prof. Marco Antônio Rodrigues Drummond, PhD

**Módulo IV**

Prof. Eloísio Queiroz Pena, M.Sc

**Módulo V**

Prof. Edimar Costa Westin, Eng.

**Módulo VI**

Prof. Valdir Costa e Silva, PhD

Prof. José Fernando Miranda, M.Sc

**Saúde e Segurança**

Prof. Jefferson Mendes

