

CETEM

**Centro de Tecnologia Mineral
Ministério da Ciência e Tecnologia**

Coordenação de Processos Mineraiis – COPM

Introdução ao Tratamento de Minérios

Adão Benvindo da Luz
Fernando A. Freitas Lins

**Rio de Janeiro
Agosto/2010**

CCL00220010

**Comunicação Técnica elaborada para o Livro Tratamento de Minérios, 5ª Edição – Capítulo 1 – pág. 3–20.
Editores: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e
Silvia Cristina A. França.**

INTRODUÇÃO AO TRATAMENTO DE MINÉRIOS

Adão Benvindo da Luz

Engenheiro de Mina pela UFPE, Doutor em
Engenharia Mineral pela USP
Pesquisador Titular do CETEM/MCT

Fernando Antonio Freitas Lins

Engenheiro Metalúrgico pela PUC-Rio, Doutor em
Engenharia Metalúrgica e de Materiais pela COPPE-UFRJ
Pesquisador Titular do CETEM/MCT; atualmente
Diretor de Transformação e Tecnologia Mineral da SGM/MME

CONCEITO DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS

Tratamento ou Beneficiamento de Minérios consiste de operações – aplicadas aos bens minerais – visando modificar a granulometria, a concentração relativa das espécies minerais presentes ou a forma, sem contudo modificar a identidade química ou física dos minerais. Há autores que defendem um conceito mais amplo para o tratamento de minérios, como sendo um processamento no qual os minerais podem sofrer até alterações de ordem química, resultantes de simples decomposição térmica ou mesmo de reações típicas geradas pela presença do calor. A aglomeração de finos de minérios (briquetagem, sinterização e pelotização), a ustulação e a calcinação são consideradas, dentro desse conceito mais abrangente, como tratamento de minérios. Os termos beneficiamento e tratamento serão usados, neste livro, indistintamente. Na língua inglesa, os termos equivalentes mais utilizados são: “ore/mineral dressing”, “ore/mineral beneficiation” e “mineral processing”.

Substância mineral, ou simplesmente *mineral*, é todo corpo inorgânico de composição química e de propriedades físicas definidas, encontrado na crosta terrestre. *Minério* é toda rocha constituída de um mineral ou agregado de minerais contendo um ou mais minerais valiosos, que podem ser aproveitados economicamente. Esses minerais valiosos, aproveitáveis como bens úteis, são chamados de *minerais-minério*. O mineral ou conjunto de minerais não aproveitados de um minério é denominado *ganga*.

As operações de concentração – separação seletiva de minerais – baseiam-se nas diferenças de propriedades entre o mineral-minério (o mineral de interesse) e os minerais de ganga. Entre estas propriedades se destacam: massa específica (ou densidade), suscetibilidade magnética, condutividade elétrica, propriedades de química de superfície, cor, radioatividade, forma etc. Em muitos casos, também se requer a separação seletiva entre dois ou mais minerais de interesse.

Para um minério ser concentrado, é necessário que os minerais estejam fisicamente liberados. Isto implica que uma partícula deve apresentar, idealmente, uma única espécie mineralógica. Para se obter a liberação do mineral, o minério é submetido a uma operação de redução de tamanho – cominuição, isto é, britagem e/ou moagem –, que pode variar de centímetros até micrometros. Como as operações de redução de tamanho são caras (consumo de energia, meio moedor, revestimento etc.), deve-se fragmentar só o estritamente necessário para a operação seguinte. Para evitar uma cominuição excessiva, faz-se uso de operações de separação por tamanho ou classificação (peneiramento, cicloneamento etc.), nos circuitos de cominuição. Uma vez que o minério foi submetido à redução de tamanho, promovendo a liberação adequada dos seus minerais, estes podem ser submetidos à operação de separação das espécies minerais, obtendo-se, nos procedimentos mais simples, um concentrado e um rejeito.

O termo *concentração* significa, geralmente, remover a maior parte da ganga, presente em grande proporção no minério. A *purificação*, por sua vez, consiste em remover do minério (ou pré-concentrado) os minerais contaminantes que ocorrem em pequena proporção.

Na maioria das vezes, as operações de concentração são realizadas a úmido. Antes de se ter um produto para ser transportado, ou mesmo adequado para a indústria química ou para a obtenção do metal por métodos hidro-pirometalúrgicos (áreas da Metalurgia Extrativa), é necessário eliminar parte da água do concentrado. Estas operações compreendem desaguamento (espessamento e filtração) e secagem.

A Figura 1 mostra um fluxograma típico de tratamento de minérios, com recirculação de água. O minério bruto (com frequência denominado ROM, de “run-of-mine”) procedente da etapa de lavra de uma mina passa por diversas operações unitárias, que são assim classificadas:

- (i) cominuição: britagem e moagem;
- (ii) peneiramento (separação por tamanhos) e classificação (ciclonação, classificação em espiral);
- (iii) concentração: gravítica, magnética, eletrostática, flotação etc.
- (iv) desaguamento: espessamento e filtração;
- (v) secagem: secador rotativo, *spray dryer*, secador de leito fluidizado;
- (vi) disposição de rejeito.

A Figura 2 mostra, como exemplo real de beneficiamento, um fluxograma da usina do minério de ferro de Carajás, da Vale.

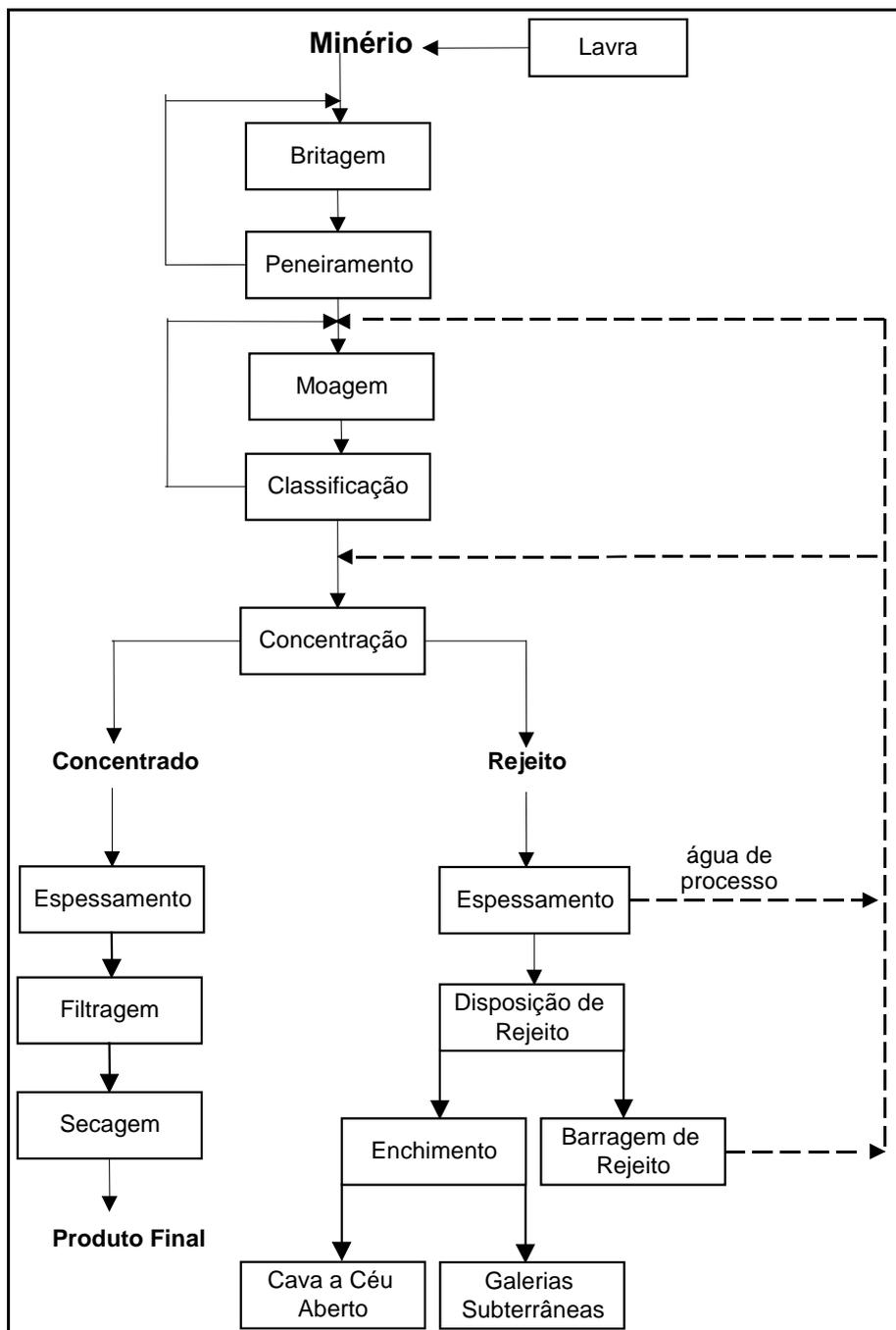


Figura 1 – Fluxograma típico de tratamento de minério.

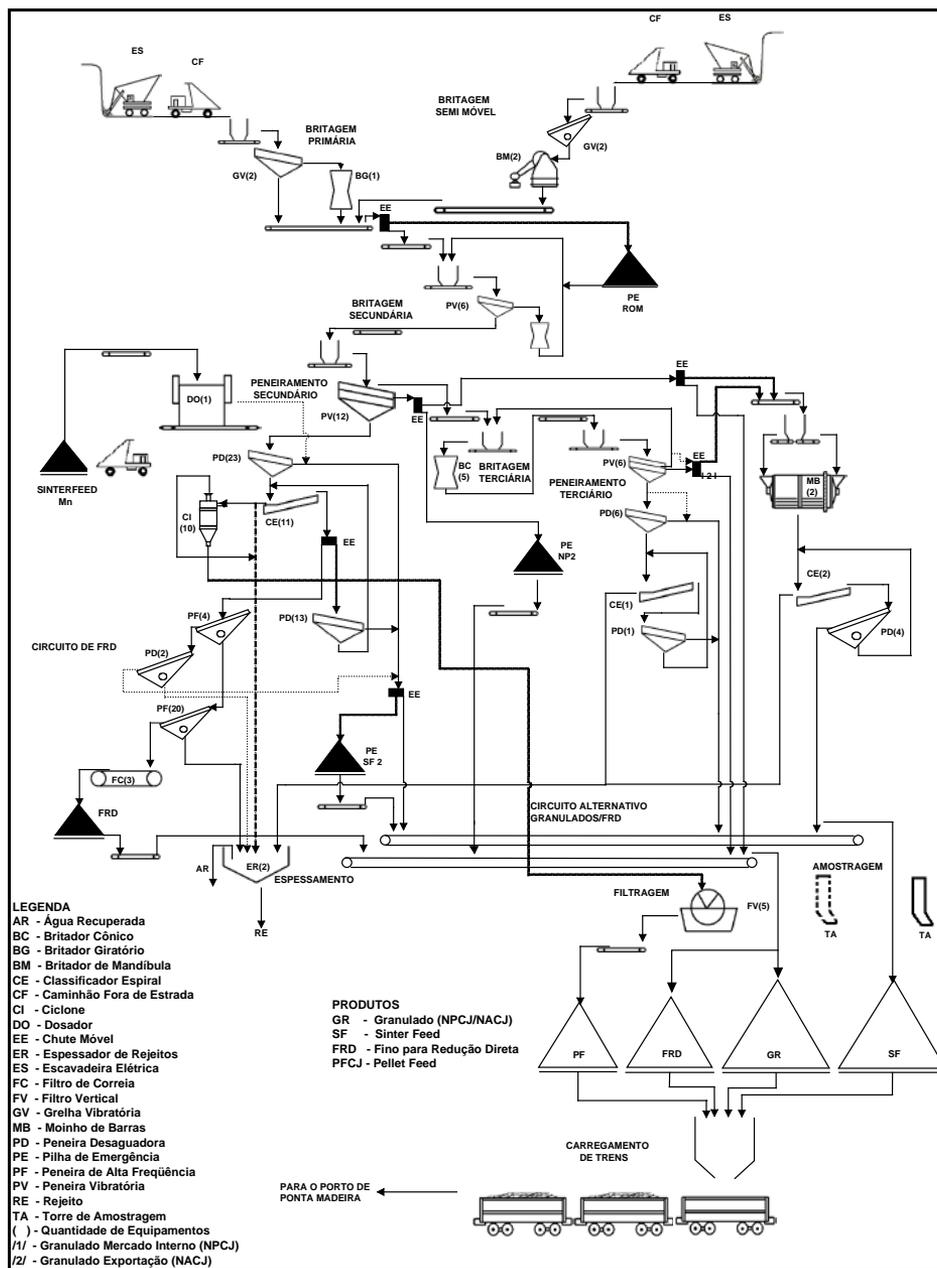


Figura 2 – Fluxograma simplificado do beneficiamento de minério de ferro – Carajás.

Fonte : Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil – CETEM/ 2001

HISTÓRICO

A história registra que, 400 anos antes da Era Cristã, os egípcios já recuperavam ouro de depósitos aluvionares, usando processos gravíticos.

O primeiro texto que se constituiu em instrumento de referência sobre os bens minerais (*De Re Metálica*) foi publicado em 1556 por Georges Agrícola. Neste, já há registro da utilização do moinho tipo pilão movido a água, concentração gravítica através de calha e concentração em leito pulsante obtido com o auxílio de peneira em forma de cesta (um jigge primitivo).

A partir do século XVIII, com a invenção da máquina a vapor, que se caracterizou como o início da revolução industrial, ocorreram inovações mais significativas na área de tratamento de minérios. Pela metade do século XIX, em 1864, o emprego do tratamento de minérios se limitava praticamente àqueles de ouro, cobre nativo e chumbo.

Os grandes desenvolvimentos na área de beneficiamento de minérios ocorreram no final do século XIX e início do século XX (Quadro 1), sendo a utilização industrial da flotação, na Austrália, em 1905, a inovação mais impactante. Os avanços que se seguiram se orientaram, do ponto de vista tecnológico, mais ao desenvolvimento de *design* de equipamentos maiores e mais produtivos ou eficientes (anos 40-70); à otimização de processos por meio de automação e computação (anos 70-90), e que continua uma área de muito desenvolvimento; e à racionalização do uso de energia nos anos 70, com a crise de aumento súbito dos preços de petróleo. Mais recentemente, com a crise de energia elétrica no Brasil, em 2001, houve um renovado interesse pela racionalização de seu uso. Nos próximos anos, em face das evidências de um aquecimento global em curso, prevê-se preocupação crescente com o uso racional de energia. Apesar do grande esforço de pesquisa, direcionado à melhor compreensão dos fenômenos atuantes nas operações de beneficiamento, houve relativamente poucos saltos tecnológicos como consequência deste esforço, verificando-se mais uma evolução incremental no desempenho dos processos.

Quadro 1 – Cronologia das principais inovações ocorridas em tratamento de minérios (séculos XIX, XX e XXI).

COMINUIÇÃO

Moinho pilão

descrito por Agrícola já no século XVI e operado por força hidráulica; mecanizado no século XIX, inicialmente com máquina a vapor e posteriormente força elétrica.

Britador de rolos

inventado na Inglaterra (1806); introduzido nos Estados Unidos em 1832.

Britador de mandíbulas

patenteado por Blake nos Estados Unidos (1858); primeiro uso em 1861 e logo após introduzido na Europa.

Britador giratório

inventado por Bruckner na Alemanha (1876); primeiro uso com minérios, nos EUA, em 1905.

Moinho de barras

testado primeiramente no Canadá em 1914. A partir de 1920 passou, gradualmente, a substituir o britador de rolos.

Moagem autógena

período de desenvolvimento (1945-1955); maior aplicação a partir de 1970. A partir de 1980 deu-se ênfase à fabricação de grandes moinhos com diâmetros em torno de 40 pés.

Moinho de rolos de alta pressão (“high pressure roll mill”)

desenvolvido na Alemanha na década de 80, aplicado inicialmente à indústria de cimento, nos últimos anos seu uso tem se estendido aos minérios convencionais (ferro, ouro etc.). Usado no Brasil, há alguns anos, na indústria de cimento e com minérios de ferro.

SEPARAÇÃO POR TAMANHO E CLASSIFICAÇÃO

classificação mecânica (1905)

ciclone (1930)

peneira DSM (1960)

CONCENTRAÇÃO GRAVÍTICA

Mesa Wilfley: patenteada em 1896, em largo uso em 1900.

Separação em meio denso estática (1930-1940).

Ciclone de meio denso (1945).

Espiral de Humphreys (1943).

Separador de meio denso Dynawhirpool (DWP), em 1960.

Concentrador centrífugo (1980), aplicado a minérios de ouro e depois a outros minérios.

SEPARAÇÃO MAGNÉTICA E SEPARAÇÃO ELETROSTÁTICA

Separador de baixa intensidade, imã permanente: apatita/magnetita (1853).

Primeira aplicação da separação eletrostática foi com esfarelita/pirita (1907).

Separador magnético via úmida de alta intensidade (1960).

Separador magnético de alto gradiente (separador magnético criogênico), em 1989.

Separador magnético de imã permanente de terras raras (anos 90).

Quadro 1 – Cronologia das principais inovações ocorridas em tratamento de minérios (séculos XIX, XX e XXI) (continuação).

FLOTAÇÃO

Conceitos iniciais pelos irmãos Bessel (1877) recuperando grafita com óleo (flotação oleosa). Esses, provavelmente, são os pre-cursos da flotação por espuma.

No período 1902/1905 foram registradas patentes de aeração da polpa. Com isso, reduziu-se a quantidade de óleo de forma significativa. É o início da flotação moderna. (Em 2005, em diversos eventos técnicos internacionais, comemorou-se o centenário da flotação).

Utilização de álcoois solúveis em água como espumantes (1908) para melhorar a estabilidade da espuma (mais tarde o óleo de pinho foi mais largamente usado).

Em 1912 a flotação deslanchava industrialmente na Austrália (recuperação de esfarelita de rejeitos gravíticos de concentração de galena) e nos EUA (finos de esfarelita). Neste ano também houve a descoberta em laboratório que os sulfetos de cobre também podiam ser flotados.

Patente na Austrália do uso do sulfato de cobre como ativador da esfalerita (1912). Em 1915 verificou-se que a cal deprimia a piritita. Alguns anos depois foi descoberto o efeito do cianeto de sódio (1922) e do sulfeto de sódio. Era o início da flotação seletiva entre sulfetos.

Até 1924, o coletor usado era óleo. Em 1925, os xantatos foram patenteados como coletores. Em 1926 foi a vez dos ditiofosfatos. No período 1925-1950, a flotação desenvolveu-se empiricamente, caracterizando-se por tratamento de minerais não-sulfetados e pelo uso de reagentes surfatantes convencionais como coletores de flotação.

O período 1950-1990 caracterizou-se pelas pesquisas fundamentais e aplicadas direcionadas ao conhecimento e controle dos fenômenos da flotação. Poucas inovações tecnológicas de maior impacto surgiram. Destaca-se a flotação em coluna nos anos 60/70, com crescente aplicação industrial desde os anos 90, com diversos aperfeiçoamentos desde então. Na década de 90 foi desenvolvida na Austrália a célula Jamenson e na Alemanha, a célula Ekof.

Centenária em sua aplicação no mundo, no Brasil há notícias de utilização da flotação só na década de 50, com minério de chumbo, no estado de São Paulo. Nos anos 70 ocorreu no Brasil uma contribuição muito significativa do Prof. Paulo Abib Andery ao desenvolver o processo de separação de apatita de ganga carbonática. Este processo original, reconhecido por seus pares no Congresso Internacional de Processamento Mineral, Cagliari – Itália/1975, permitiu o aproveitamento econômico do carbonato apatítico do Morro da Mina, Cajati, SP e de depósitos similares, como Araxá (MG) e Catalão (GO).

MODIFICAÇÃO DE MINERAIS

As rochas e os minerais industriais são considerados os recursos minerais desse novo milênio. Em vista disto, vem se observando o desenvolvimento de processos para modificação físico-química dos minerais, visando melhorar a sua funcionalidade e ampliar suas aplicações práticas. Cresce, no País, o interesse pelos agrominerais, visando principalmente a agroenergia, voltada para o desenvolvimento de novas fontes e rotas tecnológicas para obtenção de fertilizantes alternativos de fósforo e potássio, inclusive corretivos de solo, que contribuam para diminuir a vulnerabilidade do setor e lhe dê sustentabilidade.

Fontes: Arbiter, Kitchener; Fuerstenau, Guimarães e acréscimos por parte dos autores deste capítulo.

DEPÓSITOS E JAZIDAS MINERAIS

Os minerais fazem parte dos recursos naturais ao lado das terras para agricultura, das águas (de superfície e subterrânea), biodiversidade etc. Os estudos geológicos e hidrológicos básicos de um país ou região são realizados, via de regra, por seu serviço geológico ou entidade equivalente, que os disponibiliza para o público. No Brasil, essa missão está a cargo da CPRM - Serviço Geológico do Brasil/MME. A gestão dos recursos minerais do país, os quais, constitucionalmente, pertencem à União, é atribuição do DNPM/MME.

Como as matérias-primas minerais possíveis de serem utilizadas diretamente ou transformadas pela indústria encontram-se distribuídas de maneira escassa na crosta terrestre, cabe às empresas de mineração, com base nas informações geológicas básicas, realizar a pesquisa (exploração) mineral em áreas previamente selecionadas, em busca de depósitos de potencial interesse econômico. Feitas a quantificação e a qualificação do corpo mineral (cubagem), tem-se um depósito mineral. Quando este apresenta condições tecnológicas e econômicas (e, cada vez mais, ambientais) de ser aproveitado, tem-se finalmente uma jazida mineral.

A extração ou exploração do minério de uma jazida é realizada por meio de operações de lavra (a céu aberto ou subterrânea) na mina. O produto da mina, o minério lavrado, o ROM ("run-of-mine"), vem a ser a alimentação da usina de tratamento.

O preço de mercado de um determinado bem mineral, importante para a definição de uma jazida, está condicionado a um elevado número de variáveis. Entre outras, salientamos: frequência em que ocorrem esses minerais na crosta terrestre; complexidade na lavra e beneficiamento, distância da mina ao mercado consumidor etc. Vale ressaltar o aspecto circunstancial, pois em dependência da conjuntura político-econômica um depósito pode passar a ser uma jazida ou vice-versa.

MINERAIS E SEUS USOS

Qualquer atividade agrícola ou industrial, no campo da metalurgia, da indústria química, da construção civil ou do cultivo da terra, utiliza os minerais ou seus derivados. Os fertilizantes, os metais e suas ligas, o cimento, a cerâmica, o vidro, são todos produzidos a partir de matérias-primas minerais.

É cada vez maior a influência dos minerais sobre a vida e desenvolvimento de um país. Com o aumento das populações, cada dia se necessita de maior quantidade de matéria-prima para atender às crescentes necessidades do ser humano. É difícil imaginar o nível material alcançado por nossa civilização, sem o uso dos minerais. Com efeito, o consumo *per capita* de minerais e materiais nos países desenvolvidos é 3 a 6

vezes superior àquele de países em desenvolvimento, como o Brasil, o que mostra o potencial de crescimento do consumo interno.

São conhecidas atualmente cerca de 1.550 espécies minerais distintas. Destas, cerca de 20 são elementos químicos e encontram-se no estado nativo (cobre, ouro, prata, enxofre, diamante, grafita etc.). O restante dos minerais é constituído por compostos, ou seja, com mais de um elemento químico (ex.: barita - BaSO_4 , piritita - FeS_2).

Na indústria mineral, os minérios ou minerais são geralmente classificados em três grandes classes: metálicos, não-metálicos e energéticos. A classe dos não-metálicos pode ser subdividida em rochas e minerais industriais, gemas, e águas minerais. Os minerais industriais se aplicam diretamente, tais como se encontram ou após algum tratamento, ou se prestam como matéria-prima para a fabricação de uma grande variedade de produtos. Segue a classificação detalhada dos minerais.

Minerais metálicos

ferrosos (têm uso intensivo na siderurgia e formam ligas importantes com o ferro): além do próprio ferro, manganês, cromo, níquel, cobalto, molibdênio, nióbio, vanádio, wolfrâmio;

não-ferrosos: básicos (cobre, zinco, chumbo e estanho) e leves (alumínio, magnésio, titânio e berílio);

preciosos: ouro, prata, platina, ósmio, irídio, paládio, rutênio e ródio;

raros: escândio, índio, germânio, gálio etc.

Rochas e minerais industriais (RMIs)

estruturais ou para construção civil: agregados (brita e areia), minerais para cimento (calcário, areia, argila e gipsita), rochas e pedras ornamentais (granito, gnaisse, quartzito, mármore, ardósia etc.), argilas para cerâmica vermelha, artefatos de uso na construção civil (amianto, gipsita, vermiculita etc.);

indústria química: enxofre, barita, bauxita, fluorita, cromita, piritita etc.;

cerâmicos: argilas, caulins, feldspatos, sílica, talco, zirconita etc.;

refratários: magnesita, bauxita, cromita, grafita, cianita etc.;

isolantes: amianto, vermiculita, mica etc.;

fundentes: fluorita, calcário, criolita etc.;

abrasivos: diamante, granada, quartzito, coríndon etc.;

minerais de carga: talco, gipsita, barita, caulim, calcita etc.;

pigmentos: barita, ocre, minerais de titânio;

agrominerais (minerais e rochas para a agricultura): fosfato, calcário, sais de potássio, enxofre, fonolito, flogopita, gipsita, zeólita etc.;

minerais “ambientais” (ou minerais “verdes”): bentonita, atapulgita, zeólitas, vermiculita etc., utilizados (na forma natural ou modificados) no tratamento de efluentes, na adsorção de metais pesados e espécies orgânicas, ou como dessulfurantes de gases (calcário).

Gemas

pedras preciosas: diamante, esmeralda, safira, turmalina, opala, topázio, águas marinhas, ametista etc. (Segundo especialistas, a terminologia “semi-preciosas” não deve ser mais usada).

Águas

minerais e subterrâneas.

Minerais energéticos

radioativos: urânio e tório;

combustíveis fósseis: petróleo, turfa, linhito, carvão e antracito, que embora não sejam minerais no sentido estrito (não são cristalinos e nem de composição inorgânica) são estudados pela geologia e extraídos por métodos de mineração.

NECESSIDADE DE BENEFICIAMENTO

Frequentemente, um bem mineral não pode ser utilizado tal como é lavrado. Quando o seu aproveitamento vai desde a concentração até a extração do metal, por exemplo, a primeira operação traz vantagens econômicas (e energéticas) à metalurgia, devido ao descarte de massa (rejeito), alcançado na etapa de concentração. Exemplo: um minério de scheelita, com teor de 0,35% de WO_3 não pode ser utilizado economicamente na metalurgia extrativa. Isto só é possível após concentração gravítica (jigüe, mesa) ou por flotação, até a obtenção de concentrados com cerca de 70% WO_3 .

Por outro lado, nem sempre é possível concentrar o minério, como é o caso das lateritas niquelíferas de Goiás e Pará, onde o seu aproveitamento só é viável partindo-se direto para a extração do metal por hidrometalurgia. Isto é devido à distribuição do níquel na rede cristalina dos minerais de ganga e, além do mais, sem nenhuma preferência por determinado mineral, impedindo assim uma concentração.

Outrossim, pode ser interessante economicamente não chegar ao elemento útil, mas a um produto intermediário. Uma rota alternativa de processamento para as lateritas niquelíferas é o processo pirometalúrgico que leva ao ferroníquel, em vez de ao níquel metálico. Este processo consiste numa calcinação seguida de redução em forno elétrico.

FINALIDADES ECONÔMICA E SOCIAL

As etapas de lavra e de tratamento de minérios constituem uma atividade econômica definida e contabilizada nas contas nacionais pelo IBGE, sob a denominação de *extrativa mineral* ou *mineração*. Sua participação no Produto Interno Bruto-PIB (exclusive petróleo&gás) é da ordem de 1,0%. Com uma visão mais abrangente da indústria mineral, considerando a transformação dos minerais (a metalurgia, incluindo a siderurgia, e produtos não-metálicos), alcança a participação de 5% do PIB e corresponde a 20% das exportações brasileiras.

O tratamento de minérios, apesar de ser essencialmente técnico em suas aplicações práticas, não pode desprezar o conceito econômico. É impossível, na prática, obter uma separação completa dos constituintes minerais. Sabe-se, como regra geral, que quanto maior o teor dos concentrados, maior é a perda, ou seja, mais baixas são as recuperações. Como a obtenção de teores mais altos e melhores recuperações normalmente implicam num aumento de custo do tratamento, para a obtenção de maiores lucros esses vários itens devem ser devidamente balanceados. Deve-se sempre ter em mente, regra geral, que os custos decorrentes de uma etapa adicional de tratamento de um determinado bem mineral não devem ser maiores do que a agregação de valor ao produto assim obtido, excetuando-se os casos especiais (em caso de guerra, por exemplo).

O tratamento de minérios, como toda e qualquer atividade industrial, está dirigido para o lucro. Há, porém, um conceito social que não pode ser desprezado, qual seja, o princípio da conservação dos recursos minerais, por se tratar de bens não renováveis. As reservas dos bens minerais conhecidos são limitadas e não se deve permitir o seu aproveitamento predatório, pois o maior lucro obtido, em menor prazo possível, dificilmente estará subordinado aos interesses sociais. Diz-se, a respeito, em contraposição à agricultura, que “minério só dá uma safra”.

MEIO AMBIENTE, ENERGIA, CO₂ E ÁGUA

Hoje, o aproveitamento dos recursos minerais deve estar comprometido com os princípios de desenvolvimento sustentável (*satisfazer as necessidades do presente sem prejuízo das futuras gerações*); isso implica, entre outros fatores, no aproveitamento racional dos recursos naturais, preservando-se o meio ambiente.

Na década de 1970, com o surgimento dos movimentos ambientalistas, exigências mais rígidas para abertura de novas minas fizeram-se necessárias, adotando-se, então, o Estudo de Impacto Ambiental- EIA e o Relatório de Impacto Ambiental- RIMA também para a mineração. Logo a seguir, surgiu o conceito de desativação de mina que passou a ser uma exigência já prevista no próprio projeto de lavra, constituindo-se em importante instrumento para se introduzir tecnologias de prevenção da poluição.

O tratamento de minérios não chega a ser uma fonte de grande contaminação ambiental, em comparação com a agricultura (pelos fertilizantes químicos e, principalmente, defensivos agrícolas utilizados) e com outras atividades industriais, como a própria transformação dos minerais em metais e em produtos não-metálicos, mais intensivos em energia e na emissão de gases de efeito estufa. Porém, é inegável que o descarte dos rejeitos das usinas de beneficiamento pode eventualmente resultar num apreciável fator de poluição. Medidas preventivas ou corretivas são geralmente necessárias, especialmente, com rejeitos de minérios metálicos e carvões.

Há uma pressão crescente na mineração para que os rejeitos de beneficiamento, ao invés de danificarem os terrenos, sejam usados, por exemplo, para preenchimentos de minas (“back-fill”), visando à restauração das áreas mineradas, ou que sejam cuidadosamente dispostos. Uma tendência também existe para o estudo do aproveitamento de rejeitos de atividades minerais, como alternativa a outros materiais, a exemplo de areia artificial a partir de finos de brita, o emprego de rochas contendo potássio para uso como fertilizante, rejeitos de beneficiamento de minério de ferro para utilização em estradas em substituição à brita, entre vários outros casos.

Vale ressaltar que a crescente tendência mundial de reciclagem de materiais e aproveitamento de resíduos industriais e urbanos tem sido feita com uso intensivo das tecnologias correntes de tratamentos de minérios, ou variantes dessas, objeto dos demais capítulos deste livro. Ou seja, para o processamento ou separação seletiva de quaisquer materiais, a arte do tratamento de minérios dá importante contribuição.

Todos os segmentos industriais e de serviços estão diante do desafio da produção mais limpa (“aplicação contínua de uma estratégia preventiva integrada relativa a processos, produtos e serviços, visando aumentar a eficiência e reduzir os riscos para a saúde humana e para o meio ambiente”). Sabe-se que, em mineração, para se ter processos mais limpos, é indispensável fazer investimento direto em pesquisa e desenvolvimento tecnológico. Em outros ramos da indústria, geralmente é possível replicar um mesmo tipo de solução para grande número de empresas, como em uma fábrica de automóveis ou de refrigerantes. Porém, no caso do processamento de substâncias minerais, as soluções são para cada caso.

Quanto à utilização de **energia** na mineração, os dados do Balanço Energético Nacional (BEN-EPE/MME, acessível no *site* do MME) agregam os consumos de lavra, tratamento de minérios e pelotização de minério de ferro (que nesta 5ª edição do livro ganha um capítulo). Em 2007, o consumo atingiu $0,13 \times 10^9$ GJ, ou 1,6% do consumo final energético do país ($8,4 \times 10^9$ GJ), incluindo o consumo de energia elétrica. Este foi 10,6 TWh (ou 10,6 bilhões de kWh), 2,6% do consumo brasileiro de energia elétrica no mesmo ano (412 TWh). A Tabela 1 apresenta os dados de mineração (lavra e tratamento de minérios) separados dos de pelotização.

Tabela 1 – Consumo final energético da Mineração (lavra e tratamento) e Pelotização.

	Energia Total		Energia Elétrica		Energia Elétrica (% da energia total)
	(10 ⁹ GJ*)	(%)	(TWh)	(%)	
1.Mineração	0,069	0,82	8,44	2,05	44
2.Pelotização	0,061	0,73	2,16	0,52	13
Total (1 + 2)	0,13	1,6	10,6	2,6	29
<i>Brasil</i>	<i>8,4</i>	<i>100</i>	<i>412</i>	<i>100</i>	<i>18</i>

* 1 GJ = 10⁹ J = 277,8 kWh

Nota: Em 2007 a produção de pelotas atingiu 54 Mt, e foram considerados os seguintes consumos específicos: para a separação acima: energia total = 1,13 GJ/t_{pelota}; energia elétrica = 40 kWh/t_{pelota} (Lins, 2008).

A mineração estrito senso (lavra e tratamento de minérios) consumiu 8,44 TWh em 2007. Mesmo não sendo a mineração eletrointensiva, as quantidades produzidas de minérios no país são enormes, estimadas em 1,2 bilhão de toneladas para o ano de 2007, o que resulta em um consumo específico médio de 7 kWh/t de produto mineral comercializado. Todavia, há uma larga variação de consumo específico de eletricidade, a exemplo da pedra de brita, com 2 a 3 kWh/t; o minério de ferro, em média com 17 kWh/t; a pelotização de finos de minério de ferro, com cerca de 40 kWh / t_{pelota}. (São as etapas de transformação de minerais, porém, que apresentam consumos específicos muito maiores: do aço de siderúrgica integrada, com 500 kWh/t, ao alumínio, com 15.000 kWh/t; do cimento, com 109 kWh/t, ao vidro, com 550 kWh/t).

Não foram encontradas informações consolidadas que permitissem separar, no Brasil, o consumo energético da etapa de lavra da etapa de tratamento de minérios. Dados da mineração dos EUA, de 1997, mostraram que a energia elétrica respondia por 38% do consumo energético total (0,23 x 10⁹ GJ). Deste consumo energético total, a lavra mineral participava com 47% e o tratamento de minérios, com 53%. Em geral, a etapa de cominuição (britagem/peneiramento e moagem/classificação) responde por cerca da metade do consumo elétrico de uma usina de tratamento de minérios.

A **emissão de CO₂** e de outros gases de efeito estufa na mineração é muito pequena, relativamente a outros processos industriais. A lavra mineral, em decorrência do uso de explosivos e combustíveis para a movimentação (transporte) de material, pode apresentar emissão entre 1 e 7 kg de CO₂ /t_{ROM}. No tratamento de minérios, esse tipo de emissão (*in situ*) é reduzida, pois se emprega predominantemente a energia elétrica para o funcionamento dos motores e equipamentos da usina. Obviamente, se a energia elétrica é produzida na usina, pelo uso de gerador a óleo, haverá emissão *in situ*. Se provém de uma termoeletrica distante, haverá a emissão de CO₂ no local da geração. A título de comparação com a mineração, a emissão *in situ* de uma siderúrgica integrada a coque é da ordem de 1.700 kg de CO₂ /t_{aço}; do cimento, 900 kg/t.

O uso mais racional de **água** é uma tendência observada na mineração. Em anos recentes, os relatórios de sustentabilidade dos grandes grupos internacionais de mineração trazem mais informações sobre o uso da água e seu tratamento, com apresentação de indicadores e metas de redução de consumo específico e de aumento da recirculação de água.

No Brasil, é significativa a reciclagem da água de processo nas grandes minerações (cerca de 70%, chegando em alguns casos a 90%), e estas geralmente contam com sistemas adequados de tratamento dos efluentes líquidos. Esta prática tende, mais lentamente, a se estender às pequenas e médias empresas. A cobrança da água aos usuários, inclusive às minerações, pela captação dos recursos hídricos, deverá acelerar a adoção de gestão mais racional desse recurso.

Infelizmente, ainda não foi feito no Brasil um censo hídrico na mineração brasileira (nem em qualquer outro setor industrial). Nos EUA (desde 1950) e no Canadá (desde 1970) são realizados levantamentos a cada cinco anos. Pode-se assim acompanhar a evolução do uso da água nos vários setores, e o efeito de políticas públicas ou de iniciativas setoriais sobre a utilização mais racional da água. De qualquer modo, publicações recentes (algumas apresentadas na bibliografia deste capítulo) já apresentam dados de algumas empresas de mineração que tornaram público suas informações sobre consumo e recirculação de água.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este início do século XXI encontra o país empregando o estado da arte no tratamento de minérios, por suas grandes empresas de mineração, nacionais ou estrangeiras, na operação e otimização das usinas de tratamento. No entanto, as micro, pequenas e médias mineradoras enfrentam o desafio de aprimorar seus processos produtivos, inclusive com respeito às questões ambientais; para não citar a gestão empresarial, normalmente deficiente.

Este novo século testemunha também um novo “boom” mineral, depois de mais de vinte anos de baixa demanda e valorização dos bens minerais. Atribui-se a China, principalmente, e a Índia, que apresentam 40% da população do planeta e, há muitos anos, altas taxas de crescimento, a principal causa pela grande demanda de matérias-primas minerais. Os preços unitários dispararam. O Brasil, em decorrência, atravessa um período extraordinário na mineração. A crise financeira internacional de setembro/2008, apesar de ter adiado muitos investimentos em mineração no país, já apresenta sinais de superação, pelo menos no Brasil. Com efeito, as últimas previsões (janeiro/2010) alcançam US\$ 45 bilhões para os próximos 4-5 anos, cerca da metade em minério de ferro.

As empresas (antes da crise) já registravam a falta de engenheiros disponíveis para atender a crescente necessidade por esses profissionais. Na década de 70 formou-se no país uma geração de especialistas em tratamento de minérios. Os cursos das universidades brasileiras são em geral de boa qualidade. Já são comuns, diferentemente do passado, as publicações por autores brasileiros de livros sobre tratamento de minérios em geral, como este, e sobre temas específicos como cominuição, concentração gravítica e flotação (os mais recentes estão listados na bibliografia consultada). Se em parte dos anos 80 e nos anos 90 houve um desinteresse, não só no Brasil, pela mineração como atividade profissional, a atual conjuntura aponta para o ressurgimento da atratividade para essa área entre os estudantes.

Na área de pesquisa e desenvolvimento o país apresenta departamentos universitários e institutos de pesquisa relativamente bem consolidados nos tópicos que constituem o tratamento de minérios. Na década de 90 houve uma escassez de recursos financeiros para pesquisa. Em anos recentes foi criado um fundo setorial para a área mineral, no MCT. Um alento, mais ainda reconhecidamente insuficiente. Foi concluído em 2007 um estudo prospectivo de tecnologia mineral, com horizonte até 2015, coordenado pelo CETEM e pela CPRM. O projeto foi financiado pelo CT-Mineral/FINEP, e os temas e as linhas de pesquisa identificados, inclusive em tratamento de minérios (cominuição, flotação etc.) demandam maiores e contínuos investimentos em P&D, privados e públicos, do que os disponíveis atualmente.

A maior empresa brasileira, Vale, recentemente, deu início à promoção e ao fomento de P&D nas instituições de C&T nacionais e em parcerias com algumas FAPs estaduais. É um fato promissor. Espera-se que outras grandes empresas de mineração, brasileiras e estrangeiras, sigam o exemplo. Essa prática já é adotada há décadas pelas grandes empresas do mundo, especialmente apoiando as instituições de P&D dos países onde estão sediadas. Não se trata de gestos de simpatia, obviamente, mas a percepção que a competitividade no longo prazo, em um mundo cada vez mais globalizado, dependerá crescentemente da capacidade de inovação tecnológica das mineradoras. Na visão de curto prazo do acionista, pode ser mais rápido e até mais barato importar um pacote tecnológico. E é verdade. Mas as organizações de grande porte, muitas vezes propulsoras do desenvolvimento industrial em seus países, pelos elos nas cadeias a montante e a jusante, e pela liderança setorial, geralmente tendem a perceber o papel que lhes cabe no desenvolvimento tecnológico do país, em sua área de atuação. Assim nos diz a história do século XX.

A área de engenharia mineral no país também ressurgiu com maior dinamismo nos últimos anos. Assim, o desenvolvimento de rota tecnológica específica para um determinado minério, de ensaios de laboratório à engenharia conceitual e de detalhe, encontra no país, em geral, a competência requerida. (Já o mesmo não se pode afirmar quanto à metalurgia extrativa, incluindo-se a siderurgia, predominando a importação de pacotes tecnológicos). O potencial para a exportação desse conhecimento em

engenharia mineral, dessa competência, para outros países ainda não foi aproveitado. A internacionalização das grandes mineradoras brasileiras, já operando em outros países e continentes, pode catalisar o processo de exportação desses serviços (como já sucede na área de petróleo). A indústria mineral chinesa dá inúmeros exemplos nesse sentido em seus projetos de mineração na África, e já começa a fazê-lo no Brasil.

Finalizando, os novos projetos em implantação no país trazem normalmente tecnologias mais avançadas em termos de controles de operação e, em decorrência, mais eficientes para o aproveitamento dos recursos minerais. A maior parte desses avanços está embarcada nos equipamentos. Como de praxe, os equipamentos são desenvolvidos pelos países industrialmente avançados (muitos deles inexpressivos no atual cenário mundial de mineração) e importados, ou fabricados aqui sob licença. Esse segmento, de equipamentos, é uma oportunidade de desenvolvimento ainda pouco explorada no país, um desafio de longo prazo, em face do potencial de o país crescer e se consolidar como um líder mundial na mineração.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AGRÍCOLA, De Re Metalica.

ARBITER, N. Milling Methods in the Americas. New York: Gordon & Breach Science Publisher, 1964, p. 6-8.

ARBITER, N. Mineral Processing - past, present and future. *In: Advances in Mineral Processing* (SOMASUDARAN, P., ed.). Colorado: SME, 1968, p. 3-13.

BALTAR, C.A.M. Flotação no Tratamento de Minérios. Departamento de Engenharia de Minas – UFPE, 9 capítulos, 2008, 213 p.

BRASIL Mineral. A Gestão das Águas. Edição Especial, junho/2008.

CHAVES, A.P. (organizador). Flotação – O estado da arte no Brasil. Signus Editora, 19 capítulos, 444 p., 2006. (Volume 4 da série *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios*, da mesma editora.)

CLIFFORD, D. Gravity Concentration Mining Magazine, March 1999, p. 136 – 148.

CONCHA, F. Fundamentos de las Operaciones Mecanicas, Departamento de Metalurgia Extrativa, Escuela de Ingenieria, Universidad de Concepcion, 1971, cap. 1.

DANA, J.D. Manual de Mineralogia, vol.2, 1 ed. Brasil, Livros Técnicos e Científicos. 1976.

FERNANDES, F.R.C.; MATOS, G.M.M.; CASTILHOS, Z.C. e LUZ, A.B. (editores). Tendências Tecnológicas Brasil 2015 – Geociências e Tecnologia Mineral. CETEM/CPRM, 16 capítulos, 2007, 380 p.

- FUERSTENAU, M.C. Froth Flotation: The First Ninety Years. *In: Advances in Flotation Technology*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration. Inc. edited by PAREKH, B. H; MILLER, J. D, 1999, p.11-33.
- GAUDIN, A. M. Principles of Mineral Dressing. New Delhi: MacGraw-Hill Publishing Company, 1971, Ch. 1.
- GUIMARÃES, J.E.P. O Vulto Humano de Paulo Abib Andery. *In: tratamento de Minérios e Hidrametalurgia*, In Memoriam Prof. Paulo Abib Andery. Publicação do Instituto Tecnológico do Estado de Pernambuco – ITEP, Recife, 1980, p.399.
- IBRAM/ANA. A Gestão de Recursos Hídricos na Mineração, 2006, 338 p.
- KITCHENER, J.A. The froth flotation process: past, present and future - in brief. *In: The Scientific Basis of Flotation* (Ives, K.J., ed.). The Hague, Martinus N. Publishers, 1984, p. 3-5.
- KUZWART, M. Prólogo. *In: Rocas y Minerales Industriales de Iberoamérica*. Editores: Benjamin Calvo Perez, Anibal Gajurdo Cubillos e Mario Maia Sanchez, Instituto Tecnológico Geominero de Espanha, 2000, p. 436.
- LUZ, A. B. e DAMASCENO, E. C. Desativação de Minas, *Tecnologia Ambiental*, Série 14, CETEM, 1996.
- LINS, F.F. Panorama das rochas e minerais industriais no Brasil. *In: Rochas e Minerais Industriais* (Luz, A. B. e Lins, F.F., eds.). 2ª Edição, cap. 1, CETEM, 2008.
- LINS, F.F. Energia e Água na Mineração (em elaboração).
- PRYOR, E.J. Mineral Processing (3rd Edition) - London: Elsevier, 1965, Chap. 1.
- SAMPAIO, C.H. e TAVARES, L.M.M. Beneficiamento Gravimétrico – uma introdução aos processos de concentração mineral e reciclagem de materiais por densidade. Editora da UFRGS, 2005, 603 p.
- SAMPAIO, J. A.; LUZ, A. B. e LINS, F. F. (editores). Usinas de Beneficiamento de Minérios do Brasil, CETEM, 2001, 398 p.
- SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S.C.A. e BRAGA, P.F.A. (editores). Tratamento de Minérios – práticas laboratoriais. CETEM, 2007, 57p.
- SÁNCHEZ, L. E., Mineração e Meio Ambiente. *In: Tendências Tecnológicas Brasil 2015*, Cap. 6, p.192-208, Editores: Francisco R. Chaves Fernandes, Gerson Manoel M. Matos, Zuleica Carmen Castilhos e Adão Benvindo da Luz, CETEM/MCT, 2007, 380 p.
- SINOPSE Mineração & Transformação Mineral, DTTM/SGM/MME, 2008. (www.mme.gov.br, em publicações/anuários)

STRATEN, P. V., Multi-nutrient rock fertilizers. *In: Agrogeology -The use of rocks for crops*. Chap. 9, p.326-340, Department of Land Resource Science University of Guelph, Guelph, Ontario, Canada, 2007, 440 p.

TRAJANO, R.B. *Princípios de Tratamento de Minérios*. 1966.

WINTER, A.R. e SELVAGGI, J.A. Large scale superconducting separator for kaolin processing. Chemical Engineering Progress, p. 36-49, Jan. 1990.

YUSUPOV, T.S.; HEEGEN, H.; SHUMSKAYA, L.G. Beneficiation and Mechanical – Chemical Alteration of Natural Zeolites. *In: Proceeding of the XXI International Mineral Processing Congress*. Volume A, p.A1-44 – p.A1-51, July 2000, Rome Italy.