

1 Introdução

Os minerais são recursos naturais empregados pela indústria metalúrgica como a principal fonte de matéria-prima nos processos de obtenção de metais, ligas e compostos. Dessa forma, essas substâncias se apresentam como importantes commodities no mercado internacional, justificando o marcante interesse econômico no que diz respeito à sua exploração.

Segundo a definição de Nickel (1995)^[1] um mineral, em termos gerais, é um elemento ou composto químico oriundo de processos geológicos que normalmente se apresenta com uma ordenação atômica, chamada de cristalinidade, capaz de proporcionar indexação. Além dessa definição, também são atribuídos aos minerais propriedades físicas específicas, tais como: dureza, brilho, coloração, densidade, susceptibilidade magnética e molhabilidade em meio aquoso.

Normalmente, os minerais se encontram disseminados ao longo de extensos depósitos naturais que podem ser caracterizados como minérios quando for identificada pelo menos uma ocorrência cuja exploração possa ser aproveitada economicamente, conforme apresentado por da Luz *et al.* (2010)^[2]. Esse conceito, todavia, pode ser ainda mais amplo se forem considerados outros princípios para classificação de minérios tais como viabilidade técnica (mineração e metalúrgica), aspectos legais e ambientais assim como fatores governamentais que permitam a sua utilização pela indústria, segundo descrição dos relatórios IMM Reporting Code (2001)^[3] e SAMREC Code (2007)^[4].

Todavia, entre a lavra do minério e a obtenção do metal normalmente são realizadas algumas operações de preparação e adequação da matéria-prima. Tais intervenções, normalmente, estão relacionadas à liberação do mineral de interesse, ajuste granulométrico e concentração física deste antes dos processos de extração propriamente ditos. Em linhas gerais, essas operações são denominadas processamento de minérios e são constituídas, essencialmente, por processos físicos a partir das diferenças entre as propriedades dos minerais presentes

contidos no minério. Assim sendo, num primeiro momento, são conduzidos procedimentos de redução do tamanho de partícula visando aumentar a liberação do mineral de interesse assim como ajustar a granulometria do material, tais como: britagem, peneiramento e moagem. Normalmente, essas etapas são de fundamental importância nas rotas de extração, visto que a maioria dos métodos de concentração só pode ser efetuada quando os minerais da corrida da mina se encontram fisicamente desagregados. Portanto, ao ser atingido o grau de liberação adequado, específico para cada caso, inicia-se uma segunda etapa do processamento de minérios voltada para a concentração do mineral de interesse. Para atingir esse objetivo, são realizadas operações que separem a maior fração de ganga possível a partir de procedimentos que tenham seletividade física (direta ou inversa) com o mineral de interesse, tais como: jigagem, separação magnética e flotação. Espera-se que, ao final dessas operações, o teor do mineral de interesse tenha aumentado substancialmente de forma que esse material, agora denominado concentrado, possa ser submetido aos processos químicos de extração. É válido ressaltar que em diversas rotas industriais, o processamento mineral é mandatório, uma vez que a concentração do mineral de interesse se apresenta, muitas vezes, como uma condição fundamental para a rentabilidade econômica dos processos.

De forma subsequente ao processamento de minérios, é iniciada a etapa de tratamento químico desse concentrado, agora rico no mineral de interesse, com o objetivo de quebrar a sua rede cristalina a fim de extrair o metal, formar um produto intermediário, a ser utilizado numa operação posterior, ou obter um composto químico específico. Dentro desta conjuntura, uma das categorias de processos químicos mais consolidada pela indústria metalúrgica é aquela na qual o concentrado reage em altas temperaturas seja na presença de gases, materiais fundidos ou até mesmo sólidos a fim de obter um produto reacional específico. Uma segunda linha de processos químicos se dá através da solubilização dos minerais presentes, seguida por uma respectiva purificação da solução e processos de recuperação de um ou mais materiais na forma de um precipitado. Por fim, pode-se ainda estabelecer uma terceira rota de processamento a partir de reações eletroquímicas. Nesse caso, a extração é realizada a partir da aplicação de uma diferença de potencial num conjunto de eletrodos presentes numa célula de eletrólise contendo uma solução aquosa ou de sais fundidos.

No que diz respeito às reações em temperaturas elevadas, podem-se destacar as reações do tipo gás-sólido, também denominadas ustulações, como um dos mais consagrados processos utilizados pela indústria na obtenção de metais não-ferrosos, seja através da formação de produtos intermediários (ex: Zn, Pb, Ti e Mo) como também a partir de reações químicas anteriores ao refino (ex: Cu e Sn). Estas alternativas são facilmente identificadas no processamento químico de sulfetos minerais, já que alguns sulfetos podem reagir produzindo o metal de forma direta (ex: Cu e Ni) enquanto outros, normalmente, devem ser submetidos a uma transformação prévia como, por exemplo, de sulfetos para óxidos (ex: Zn e Mo). Neste último caso, após a conversão desses minerais em compostos mais adequados, são realizados outros processos metalúrgicos de extração para a obtenção, de fato, do metal ou composto de interesse.

Desta forma, a fim de se cumprirem esses objetivos, os sulfetos minerais são aquecidos abaixo da sua temperatura de fusão na presença de um reagente gasoso responsável pela remoção total ou parcial do enxofre presente na estrutura cristalina. Normalmente, esses processos são conduzidos em atmosferas ricas em oxigênio de tal forma que, dependendo das condições operacionais implementadas nos fornos de ustulação, é possível se obter óxidos, sulfatos, sulfetos menos concentrados em enxofre e até mesmo metais a partir de reduções diretas, segundo descrito por Moore (1994)^[5].

Um exemplo de tal comportamento reacional pode ser observado no sistema reacional Cu-S-O, onde a principal rota industrial de obtenção de cobre prevê uma ustulação parcial da calcopirita (CuFeS_2) até a formação do mate que, por sua vez, é convertido em outras duas etapas até a formação do metal com 98% de Cu, conforme apresentado por Habashi (2002)^[6] e Habashi *et al.* (1997)^[7]. Nesse tipo de processo, a primeira etapa é responsável pela oxidação parcial dos sulfetos de cobre ao passo que segunda etapa estimula a interação entre os produtos oxidados com os sulfetos ainda presentes até a formação do metal. Todavia, certas características dos concentrados são determinantes no que diz respeito à natureza dos processos empregados como, por exemplo, um teor mínimo de cobre presente no concentrado a ser ustulado. Caso contrário, é provável que a utilização desse material não seja economicamente rentável e, assim sendo, esse concentrado poderia ser caracterizado como não metalúrgico.

Em paralelo a essa demanda de mercado, com a crescente importância do mercado de fertilizantes nos últimos anos apresentado por Chapman (2000)^[8], tem-se buscado alternativas, economicamente mais atraentes, aos processos de fabricação de determinados compostos químicos utilizados na agricultura. Nesse sentido, a ustulação oxidante de concentrados de baixo teor do metal de interesse se apresenta, nesse setor, como uma alternativa em potencial para algumas matérias-primas, como no caso a sucata de cobre na produção de CuSO_4 . Todavia, para se empregar um concentrado de calcopirita devem se buscar a definição de condições operacionais específicas que permitam a separação do ferro contido na estrutura cristalina desse mineral. Uma alternativa para essa necessidade é reagir a calcopirita em atmosferas controladas a fim de se obter de forma seletiva CuSO_4 e Fe_2O_3 , conforme apresentado por Prasad *et al.* (2003)^[9]. Tal composição final é interessante nesse contexto, visto que viabilizaria uma separação simples entre esses compostos a partir de uma única etapa de solubilização em água.

Nesse sentido, o Departamento de Engenharia de Materiais da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro foi procurado por duas empresas, sendo uma delas especializada em produtos químicos voltados para a agricultura, para a realização de um trabalho que estudasse os aspectos envolvidos nesse processo.

Assim, dentro desse contexto, o presente trabalho tem por objetivos gerais a caracterização e o processamento químico de um concentrado de sulfetos minerais com baixo teor de cobre visando à obtenção seletiva de CuSO_4 e Fe_2O_3 . Os objetivos específicos, por sua vez, incorporam a identificação e a quantificação dos elementos presentes no concentrado mineral utilizado, o efeito da temperatura e da composição química da atmosfera reacional sobre a conversão da calcopirita nos produtos reacionais específicos. Para fundamentar esse estudo, foi realizada uma fundamentação teórica, incluindo uma breve revisão acerca dos processos envolvendo sulfetos assim como uma apreciação termodinâmica simples do sistema reacional envolvendo Cu-Fe-S-O.