

APLICABILIDADE DA ATRIÇÃO DO MINÉRIO DE FERRO EM VARGEM GRANDE¹

Fabiana Fonseca Fortes²
Carlos Alberto Pereira³
Daniel Pitta Antipoff⁴

Resumo

O objetivo deste trabalho é investigar a possibilidade de aumentar a recuperação na flotação em Vargem Grande, com a implantação da etapa de atrição do minério de ferro hematítico proveniente das Minas de Tamanduá e Capitão do Mato (Vale), localizadas no Quadrilátero Ferrífero. Na primeira etapa da investigação compararam-se as características dos minérios que obtiveram sucesso com a adoção dessa técnica e as do minério das minas em estudo. Foram realizados teste em escala de bancada de atrição, deslamagem e posterior concentração por flotação. Variou-se o tempo de agitação no teste de atrição e o pH da polpa de minério. Os resultados químicos da alimentação e dos produtos da flotação nas diferentes condições foram comparados. Concluiu-se que a implantação da atrição seguida da deslamagem em meio disperso pode trazer ganho de recuperação metalúrgica. O resultado pode ser justificado pela ocorrência de hematita porosa junto com a goethita terrosa, portadora do contaminante alumina. A etapa de deslamagem, somente, é insuficiente para a remoção dessas lamas prejudiciais a flotação. Os testes indicaram que a implantação de células de atrição, promoveria aumento da recuperação metalúrgica e índice de seletividade em aproximadamente 17% e 40%, respectivamente.

Palavras-chave: Atrição; Flotação; Minério de ferro.

IRON ORE SCRUBBING AT VARGEM GRANDE

Abstract

This subject of this paper is investigating the possibility to increase metal recovery in flotation at Vargem Grande with implementation a scrubbing stage of hematítico iron ore from Tamanduá and Capitão do Mato mines (Vale), located in Quadrilátero Ferrífero. At the first, the ore characteristics were compared of other minerals that have successful with the adoption of this technique. Tests were conducted at bench scale scrubbing, deslaming and concentration by flotation with the blend of those ores. The stirring time in a scrubbing test and pH were varied. The chemical results of feed and flotation products in the different conditions were compared. As a conclusion, the ore scrubbing followed dispersions deslaming can improve the recover if deployed industrially. This result can be explained by the presence of porous hematite occurrence tougher earthy goethite, which contains alumina. Only deslaming isn't enough for removal of harmful slime flotation. The tests indicated that industrial scrubbing cells can increase recovery and selectivity index in about 17% and 40%, respectively

Key-words: Scrubbing; Flotation; Iron ore.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Especialista em Beneficiamento Mineral e Engenheira na Diretoria de Ferrosos Sul / Vale.

³ Dr. Tecnologia Mineral e chefe do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Minas - UFOP

⁴ Engenheiro de Minas na Diretoria de Ferrosos Sul / Vale.

1 INTRODUÇÃO

Grande parte da produção mundial de minério de ferro somente se tornou tecnicamente possível nas últimas décadas com a utilização em larga escala do processo de flotação. As hematitas de altos teores cederam espaço para minérios itabiríticos de baixo teor que requerem concentração para atender a forte demanda mundial. A flotação é o método de concentração usualmente selecionado sempre que se requer um nível muito baixo de sílica no *pellet feed*,⁽¹⁾ o que não é alcançado nos processos físicos tradicionais baseados nas propriedades naturais dos minerais. Para Oliveira,⁽²⁾ supondo que a flotação passasse a ser inadequada, não existem, no horizonte de algumas décadas, alternativas com perspectivas de sucesso. Desta forma, a solução para os problemas previsíveis seria o aprimoramento do processo de flotação.

A flotação dos óxidos e silicatos, como é o caso do minério de ferro e rocha fosfática, ainda carecem de estudos para driblar problemas como a recuperação de finos.⁽²⁾ Acrescenta-se que a simples presença de partículas ultrafinas influencia negativamente no processo de flotação. Baltar⁽³⁾ aponta como efeitos nocivos da presença de lamas na flotação: o maior consumo de reagentes, a cobertura das partículas grossas pelos finos, a maior rigidez da espuma, a dificuldade para o contato bolha-partícula, a maior viscosidade da polpa, a elevada energia superficial, a adsorção não seletiva, a maior velocidade de oxidação de minérios sulfetados, a maior hidratação das superfícies, a maior solubilidade dos minerais, a pequena velocidade de sedimentação e a agregação não seletiva.

As lamas, também designadas como argilas ou argilominerais, são definidas por Santos⁽⁴⁾ como “material natural, terroso, de granulação fina, que geralmente adquire, quando umedecido com água, certa plasticidade.” Embora seja essa a definição, existe variação considerável na terminologia nos diversos setores científicos e tecnológicos.⁽⁴⁾ Talvez por esse motivo não haja consenso quanto à faixa granulométrica das lamas. Santos⁽⁴⁾ cita que um grande número de análise granulométricas mostrou que existe uma tendência geral dos argilominerais se concentrarem na fração de diâmetro inferior a 2 µm. Peres et al.⁽⁵⁾ propõe classificar partículas entre 10 µm e 1 µm como “ultrafinos” e abaixo de 1 µm como “colóides”, sendo eles constituintes das lamas. É certo, no entanto, que a fração argila é aquela que contem as partículas de menores diâmetros, que podem vir a prejudicar o processo de beneficiamento de alguma forma.

Tradicionalmente, os finos são removidos do processo de beneficiamento em etapas de deslamagem, antecedentes à flotação. Porém, nem sempre esta prática tem-se mostrado suficiente. É neste âmbito, que será tratado o processo de atrição, intrinsecamente relacionado à mineralogia.

O objetivo deste trabalho é, portanto, investigar as possibilidades de aumento da recuperação metalúrgica na flotação do minério de ferro na Instalação de Tratamento de Minério Vargem Grande, depois da inserção da etapa de atrição seguida de deslamagem em meio disperso da polpa de alimentação da flotação.

1.1 Características do Minério

A Instalação de Tratamento de Minério Vargem Grande é alimentada com o minério proveniente de duas minas: Tamanduá e Capitão do Mato. Ambas são minas do Sistema Ferrosos Sul da Vale, localizadas no Quadrilátero Ferrífero e distam, em média, 50 km da cidade de Belo Horizonte.⁽⁶⁾ As minas de Capitão do Mato e



Tamanduá estão localizadas na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero, mais precisamente no flanco leste do Sinclinal de Moeda.⁽⁷⁾ Os corpos de minério de ferro no Sinclinal de Moeda apresentam características semelhantes ao longo de quase todo flanco leste, especialmente pelo aumento da permeabilidade da rocha e percolação de fluídos meteóricos oxidantes.⁽⁷⁾

Na Mina do Tamanduá, situada no Sinclinal Tamanduá, dobra de segunda ordem do Sinclinal de Moeda, Vilela et al.⁽⁸⁾ identificaram minérios bandados formados pela alternância de martita e hematita e minérios hematíticos com nítida xistosidade. O minério hematítico friável é o tipo mais comum na Mina do Tamanduá e corresponde em massa cerca de 60 a 70% do total. Vilela et al.⁽⁸⁾ apontam a existência de martita e hematita com núcleo de kenomagnetita com bandas ricas em hematita tabular na Mina do Tamanduá. A Mina de Capitão do Mato está localizada no eixo leste do Sinclinal Moeda, aproximadamente a 3 quilômetros da Mina do Tamanduá. É constituída basicamente por minério hematítico compacto, predominante em cerca de 60% a 70% do minério total, porém são comuns as lentes de minério macio intercaladas com itabiritos ricos.

Segundo Fernandes,⁽⁶⁾ as litologias encontradas nas minas do Tamanduá e Capitão do Mato podem ser classificadas como minério hematítico, minério itabirítico silicoso friável, itabirito compacto/médio, filito, dolomito, quartzito, básica e xisto.

O minério itabirítico friável caracteristicamente desintegra-se em placas e o quartzo friável ocorre em diferentes proporções. Nas variedades magnetíticos, a goethita e limonita estão presentes.⁽⁶⁾ A goethita, um dos minerais portadores de ferro, apresenta, em geral, pouca consistência e de textura porosa. A limonita, por sua vez, seria uma forma amorfa da goethita, com água capilar e de adsorção, muitas vezes impura devido à presença de minerais argilosos e óxidos de manganês.⁽⁹⁾

Os principais minerais de ganga no minério hematítico são o quartzo, caulinita, gibbsita e argilo-minerais. O quartzo é o principal mineral de ganga e é um óxido, SiO_2 , puro com 46,7% de silício e 53,3% de oxigênio. A caulinita é um silicato de alumínio hidratado, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$, com 39,5% de alumina, 46,5% de sílica e 14,0% de água. A caulinita é de ocorrência ampla, sendo transportada pela água e deposita-se sob a forma de camadas de argilas, misturada com o quartzo e outros. A gibbsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) apresenta de 62,8% a 65,3% de Al_2O_3 e 31,8% a 34,12% de perda por calcinação.

As principais geradoras de lamas são goethita terrosa, caulinita e gibbsita. As lamas quando aderidas a superfície do mineral de ferro ou quartzo, ou inserida em seus poros ou interstícios, não são removidos por deslamagem. Queiroz et al.⁽¹⁰⁾ afirmam que as lamas constituídas por apenas caulinita são tão prejudiciais para a flotação do quartzo com eteramina quanto as lamas naturais do minério de ferro composta pela mistura de goethita, hematita, caulinita e gibbsita. A combinação de caulinita e gibbsita associadas aos poros de um minério de ferro com partículas policristalinas que sofreram intenso intemperismo e apresentam elevado nível de porosidade requerem atenção especial na deslamagem.

Schneider et al.⁽¹¹⁾ afirmam que, independente da mineralogia, a porosidade parece estar presente na maioria das reservas de minério de ferro. Para exemplificar, cita o minério de ferro de Carajás com valores tão altos quanto 50% de porosidade. Situação semelhante é observada nas minas Tamanduá e Capitão do Mato.

Fernandes⁽⁶⁾ quantificou a ocorrência de partículas porosas na assembléia mineralógica dos granulados em Tamanduá e Capitão do Mato, conforme apresentado Quadro 1.

Quadro 1. Ocorrência de partículas porosas nas minas Tamandá e Capitão do Mato⁽⁶⁾

Mina	Hematita Compacta	Hematita Compacta Porosa
Tamandá	24,3%	63,7%
Capitão do Mato	43,17%	41,83%

A explicação para a existência comum dos poros no minério de ferro pode estar nos contatos entre bandas ricas em magnetita e bandas ricas em hematita. Neste contato, desenvolve-se uma porosidade, ocasionada pela transformação de hematita em goethita, que, posteriormente é dissolvida. Poros de maior volume também estão presentes e podem ser formados pela dissolução de maghemita e kenomagnetita.⁽⁸⁾ A porosidade depende do tamanho de partícula. Existem poros tão grandes que podem ser observados em microscópio. Já os poros pequenos somente são observados em microscópios óticos, cuja profundidade de campo é menor do que a profundidade do poro,⁽¹¹⁾ Uma partícula pode ter poros interconectados ou poros isolados.

1.2 Atrição

A atrição ou “scrubagem” (do inglês, *scrubbing*) é definido por Taggart⁽¹²⁾ como:

o efeito de desintegração por forças as quais são relativamente fracas, comparado à cominuição, mas suficiente para desfazer aglomerados não consolidados, tais como as argilas, ou romper vínculos entre grãos. Atrição é usualmente provocada pela esfregamento de maiores e mais duros grãos uns contra os outros, assim como pelo abalroamento de massa, mas em alguns casos a força de jatos de água contra a massa bruta sobre uma superfície rígida é suficiente⁽¹²⁾ (tradução nossa).

A atrição seria um processo de limpeza por desagregação de argilas dos minerais, podendo ser feita de diferentes formas dependendo do grau de dificuldade. Quando a atrição objetiva remover também incrustações de argilas nas partículas dos minerais, Taggart⁽¹²⁾ aplica-se o termo *scuffing*.

O processo para remoção das lamas depende do tipo de lamas que estão presentes em relação aos minerais. As lamas podem aderir à superfície dos minerais de ferro e do quartzo ou hospedar em seus poros e interstícios.

Ao fenômeno de recobrimento da superfície do mineral por lamas, dá-se o nome de *slime coating*. O fenômeno estaria relacionado a forças eletrostáticas envolvidas na adsorção de lamas da superfície do mineral, conforme verificados em número considerável de investigações.⁽¹³⁾ Dependendo do pH do meio, cargas opostas das partículas do mineral e das lamas são atraídas. Queiroz⁽¹⁰⁾ explica que as lamas constituídas exclusivamente por caulinita teriam cargas superficiais de mesmo sinal que o quartzo para uma ampla faixa de pH e por esse motivo seriam menos nocivas a flotabilidade do quartzo com eteraminas, quando comparadas às lamas naturais de minérios de ferro, mistura de goethita, hematita, caulinita, gibbsita e outros.

Outro fenômeno seria a presença de lamas nas cavidades, relacionada, sobretudo, à porosidade do mineral. Sabedot e Sampaio⁽¹⁴⁾ avaliam tanto a presença de lamas na cavidade do mineral quanto as no recobrimento da superfície do zircão. O recobrimento dos minerais do minério de ferro seria influenciado pela heterocoagulação e seria menos freqüente em cristais compactos que naqueles com maior porosidade.⁽¹⁰⁾ Por heterocoagulação entende-se o fenômeno em que as partículas de minerais distintos apresentam cargas opostas, para uma mesma

condição de pH e dessa forma, ocorre a coagulação ordenada devido à atração eletrostática.⁽¹⁵⁾ Assim, cristais compactos seriam suscetíveis ao fenômeno *slime coating* e minérios porosos à presença de lamas em suas cavidades.

Existem alguns tipos de equipamentos cuja finalidade é remover a lamas das cavidades do minério. O método mais adequado deve ser selecionado em função do material que é classificado por Taggart⁽¹²⁾ em granular, cimentado e recoberto.

Para o material granular e o cimentado, a atrição por jateamento de água pode ser aplicado para remoção de lamas.⁽¹²⁾ O material grosso pode ser lavado em peneiras vibratórias ou *scrubber*, quando a quantidade de argila é muito alta ou que possua índice de plasticidade elevado.⁽¹⁶⁾ No entanto, a desintegração de material agregado em uma *screen scrubber* é menos efetiva que nos tambores de atrição.⁽¹²⁾ A atrição por abarroamento pode ser aplicado para material granulado com tamanho variando de 2 polegadas a 12 polegadas. O abarroamento pode ser feito em diferentes tipos de equipamentos com o mesmo princípio de funcionamento do tambor de atrição. Porém, para alguns materiais, apresenta a desvantagem de formação de agregados de argila que não se desintegram facilmente. O material recoberto é usualmente de granulometria fina e friável, podendo ser levemente cimentado por uma camada dos produtos da decomposição, como os óxidos de ferro ou similares. Neste caso, a atrição por agitação do material em polpa é recomendada.

O tratamento do material de menor granulometria com recobrimento de lamas pode ser realizada em equipamentos que promovam a agitação. Taggart⁽¹²⁾ menciona duas classes de equipamento para agitação deste tipo de material: *pug mill* e *log washer*. O *pug mill* consiste em uma calha horizontal na qual é montado um ou mais eixos com hélices, usualmente ajustado em um ângulo suficiente para o eixo mover a polpa longitudinalmente. O diâmetro da hélice varia entre 0,4 m a 0,9 m dependendo da sua função e a rotação varia entre 10 rpm e 50 rpm. A capacidade do equipamento depende do grau de desintegração necessário e do grau de dificuldade e deve ser verificado em teste experimental. As hélices têm rotações contrárias, a exemplo das atuais células de atrição. O *log washer* desintegrar as lamas e separar os finos do material granulado. Em sua versão *screw washer*, se assemelha a um lavador de rosca. Segundo Taggart,⁽¹²⁾ o *log washer* pode ser alimentado com granulometrias abaixo de três polegadas e promover a atrição mais intensa que o um *screw washer*.

A célula de atrição consiste basicamente em tanques retangulares interconectados, com agitadores verticais centrados e alimentação de polpa pelo topo. Esse equipamento promove a lavagem e limpeza das partículas por meio de intensa agitação. Em cada célula existem dois impelidores de pás perfiladas de alta eficiência, denominadas hidrofoil. Os impelidores atuam produzindo fluxos em sentidos contrários.⁽¹⁷⁾ Luz et al.⁽¹⁸⁾ explicam que “devido a inversão de sentidos, a polpa movida por uma das hélices tem sentido oposto ao do fluxo movido pela outra hélice, de modo que os dois fluxos se chocam, acarretando a atrição necessária de superfície de grão contra superfície de grão”.

No Brasil, podemos encontrar algumas propostas ou aplicações da atrição em beneficiamento mineral da areia, fosfato, zircão e hematita/goethita. No caso da areia industrial, constituída essencialmente de quartzo, a atrição auxilia na remoção de algumas impurezas (óxidos de ferro, minerais pesados e argilas). A atrição é feita para limpar a superfície das partículas da areia que após purificação por flotação ou por métodos gravíticos será empregada na confecção de vidro. Na Mineração Jundu, o beneficiamento da areia consta de desagregação em tromel, atrição da



polpa, deslamagem em hidrociclones, peneiramento, desaguamento em hidrociclones e secagem do produto final.⁽¹⁹⁾

A atrição também é aplicada nos estágios que antecedem a flotação nos circuitos de grossos e finos do fosfato na Fosfertil. A atrição se faz necessária para remoção das gangas constituídas por aglomerados e micas que podem recobrir a superfície da apatita. O minério cominuído em moinhos de bolhas é adensado em ciclones e atricionado em células com a presença de soda cáustica. Após a atrição, o minério é deslamado em ciclones e alimenta o circuito de flotação.⁽²⁰⁾

Sabedot e Sampaio⁽¹⁴⁾ verificaram, em teste semipiloto, a eficiência da atrição em células para remoção da película argilo-ferruginosa e incrustações no pré-concentrado de zircão, prejudiciais aos processos de separação eletrostática e magnética. Os contaminantes do pré-concentrado de zircão são rutilo, ilmenita, cianita e estauroлита, entre outros. Além da aderência da película argilo-ferruginosa, os minerais continham argila aderida em cavidades e irregularidades dos grãos. O equipamento, em escala semipiloto, tratava-se de uma célula de atrição de base quadrada e agitação promovida por um eixo com dupla hélice.

Queiroz⁽¹⁰⁾ realizou teste em escala de bancada de atrição de minérios de ferro (hematita e goethita) poroso e compacto na presença dos minerais contaminantes caulinita e gibbsita. Nesse caso, o objetivo da atrição era remover as lamas para maior eficiência na flotação e, conseqüente, aumento da qualidade do produto final a ser comercializado. No ensaio de atrição, foi utilizada uma célula de atrição com quatro aletas para a intensificação da agitação gerada por duas hélices invertidas, acopladas em um eixo.

Em todos os exemplos, a finalidade era adequar o material para concentração, seja por flotação (fosfato e ferro), separação eletrostática e magnética (zircão) ou por métodos gravíticos (areia industrial) e obter maior qualidade no produto final. É importante observar que, a efetividade da atrição dependerá do controle de suas variáveis.

A limpeza superficial do minério na Fosfertil é realizada em células de atrição de 72"x72" com capacidade para 50 t/h, agitador com rotação de 73 rpm, podendo ter 2, 3 ou 4 agitadores por máquina. O percentual de sólidos na polpa é de 60%. O pH da polpa é superior ao do condicionamento para flotação. O tempo de residência no minério na célula é de 15 minutos. O pH, alterado pela adição de NaOH, e o tempo de agitação da polpa mostraram serem aspectos bastante significativos para a resposta da flotação na Fosfertil, sobretudo na presença de micas alteradas, quando o controle do pH é crítico. O tempo de condicionamento, por outro lado, não deve ser excessivo, evitando-se assim novo recobrimento da superfície.⁽²¹⁾

Na atrição do pré-concentrado de zircão em escala semi-piloto, os parâmetros operacionais foram o percentual de sólidos na polpa, concentração de NaOH na polpa e tempo de agitação da polpa. Os testes foram realizados segundo a combinação do percentual de sólidos na polpa de 70% e 80%; concentração de soda cáustica de 400 g/t, 500 g/t, 600 g/t e nula; tempo de agitação de 10 minutos, 20 minutos, 30 minutos e 40 minutos. A rotação do agitador foi fixada em 1.000 rpm. A remoção total das argilas dos grãos foi observada nos ensaios realizados com 30 minutos de agitação, dosagem de soda de 500 g/t ou 600 g/t independente do percentual de sólidos. Os resultados não satisfatórios foram encontrados nos ensaios sem adição de dispersante ou tempo de residência reduzido (10 min). Nessas situações, existiam vários grãos com argila aderida em cavidades rasas e profundas, e argila aderida nas superfícies dos minerais.⁽¹⁴⁾



Os ensaios de atrição dos minérios de ferro (hematita/ goethita) foram realizados como pH da polpa do ponto de menor dispersão (5,3 a 5,8) e de maior dispersão (pH 9,8). O pH foi alterado pela adição de solução de NaOH a 5%. O tempo de agitação experimentados foram de 5 minutos e 20 minutos. A rotação foi fixada em 800 rpm. O percentual de sólidos fixado em 40%. Queiroz⁽¹⁰⁾ concluiu que, no ponto de maior dispersão, as lamas apresentam maior grau de liberação à medida que aumenta o tempo de atrição, independente das características do mineral. No ponto de menor dispersão, o aumento do tempo de atrição influi nos resultados de formas distintas para hematitas compactas (especular, lamelar e granular) e porosas (hematita martítica e goethita), possuindo materiais terrosos em seus poros e interstícios. O grau de liberação das argilas das hematitas compactas é maior com o aumento do tempo de agitação. O aumento do tempo de atrição de hematitas porosas ocasiona a coagulação da polpa ou até mesmo a não liberação das argilas quando o percentual de poros ultrapassa 39%.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Como o objetivo de investigar a possibilidade de aumento da recuperação metalúrgica e a seletividade na flotação com a inclusão de uma etapa de atrição foi realizado testes em escala de bancada. A amostra para os testes foi coletada no fluxo de *underflow* dos hidrociclones industriais que antecede o espessamento e o circuito de flotação. A amostra foi coletada no período de 6 horas, de forma que fosse representativa e possibilitasse a realização dos testes em escala de bancada após quarteada. Durante a amostragem, o circuito era alimentado pelo minério das minas Capitão do Mato e Tamanduá, homogeneizado em pilha chevron. Houve a preocupação que a amostragem fosse realizada em um turno cuja operação estivesse normal e sem interrupções, garantindo estabilidade em todas as fases do processo de beneficiamento.

Foram realizados quatro testes em escala de bancada utilizando uma célula Engendrar CFB-1000, em cuba com uma capacidade volumétrica de 1.000 cm³, com rotação de 1.500 rpm. Como coletor foi utilizada amina na dosagem de 45g por tonelada de minério. O depressor amido foi utilizado na dosagem de 720 g/t de minério.

No teste 1, a amostra foi submetida diretamente ao teste de flotação em pH natural. No teste 2, a amostra foi agitada por 3 minutos, deslamada e submetida ao teste de flotação em pH natural. No teste 3, a amostra em pH 9,8, foi agitada por 3 minutos, deslamada e submetida ao teste de flotação. No teste 4, a amostra foi agitada por 10 minutos em pH 9,8, deslamada e submetida ao teste de flotação. O teste de flotação, comum a todas as amostras, foi realizado para avaliar os resultados de recuperação metalúrgica. A deslamagem foi realizada antes da flotação nos testes 2, 3 e 4.

A análise química dos produtos foram realizadas pelo Laboratório Químico da Vale através do método de difração de raios-X. O desempenho da flotação pode ser mensurado pela recuperação metalúrgica e índice de seletividade. A recuperação metalúrgica traduz numericamente a quantidade do elemento útil que estava na alimentação e está presente no concentrado. Quanto maior esse valor, melhor.

O índice de seletividade conforme proposto por Gaudin, indica a melhor relação entre teor e recuperação. Teoricamente, esse índice pode variar de 1, quando não há separação, até ∞ . Na prática, os valores estão, em geral, entre 4 e 40.⁽²²⁾

3 DISCUSSÃO

O teste 1 serviu como parâmetro de comparação com os demais testes, uma vez que ele representa o circuito industrial atual. No circuito industrial, duas etapas de deslamagem em hidrociclones assumem a função de remoção das lamas prejudiciais à flotação. Dentre os testes, esse foi o que apresentou menor recuperação metalúrgica.

O teste 2, apesar de maior recuperação metalúrgica, apresentou resultados incoerentes. Comparativamente, o índice de seletividade deveria crescer proporcionalmente à recuperação metalúrgica.

O teste 3 apresentou resultados melhores que o teste 1, mas muito aquém dos resultados proporcionados pelo teste 4.

Os resultados do teste 4 mostraram que a recuperação metalúrgica e a seletividade na flotação foram os maiores dentre os quatro testes realizados, o que faz supor que o minério atricionado torna a superfície dos minerais mais adequada para a concentração por flotação e a deslamagem em meio disperso aumenta o potencial de descarte de partículas finas (lamas) contidas na polpa. Isso corrobora para a afirmativa que a atrição seguida da deslamagem em meio disperso seria capaz de remover as lamas da superfície dos minerais, prejudicial ao bom desempenho da flotação. Os resultados encontrados nos teste são apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Resultado dos testes

	Descrição	Recuperação	Índice Seletividade
Teste 1	Flotado em pH natural	68,3	5,4
Teste 2	Deslamado e flotado em pH natural	74,3	4,8
Teste 3	Deslamado e flotado em pH 9,8	71,5	6,5
Teste 4	Atricionado, deslamado e flotado em pH 9,8	79,9	7,5

A atrição da polpa antes da deslamagem em meio disperso promoveu acréscimo considerável na recuperação metalúrgica e na seletividade da flotação, algo em torno de 17 e 40 pontos percentuais, respectivamente. O pH de 9,8 foi o indicado para maior grau de dispersão do minério de ferro.

Vale ressaltar que essa análise somente foi possível devido à comparação entre a recuperação metalúrgica e o índice de seletividade da concentração por flotação nos quatro testes. A avaliação simplista dos teores de contaminantes do afundado do ensaio de deslamagem inviabilizaria a conclusão sobre esses testes.

A esse respeito, Sabedot e Sampaio⁽¹⁴⁾ mencionam a impossibilidade de quantificar os resultados da atrição do pré-concentrado de zircão a partir de resultados analíticos. A massa de argila aderente era de valor muito baixo, insuficiente para estabelecer diferenças entre os resultados antes e depois da atrição, pois as diferenças foram valores considerados coincidentes com os da "margem de erro" do processo analítico.

Queiroz,⁽¹⁰⁾ avaliando os resultados da atrição do minério de ferro, atesta a impossibilidade de quantificar a "fase terrosa" (lamas) por difração de raios-X, análises químicas ou microscopia óptica. Alegou o fato de a "fase terrosa" ser bastante rara, de tamanho muito pequeno além de tender a ocorrer em microporos de fases majoritárias e não apresentarem morfologia típica.



A avaliação da atrição experimentada, com sucesso, por esses autores foram: microscopia eletrônica de varredura e a microsonda com microanalisador EDS associado, para o caso do minério de ferro e a qualificação subjetiva pela observação em lupa binocular da quantidade de argila aderida aos grãos do pré-concentrado de zircão atricionados.

Sabedot e Sampaio⁽¹⁴⁾ fizeram a qualificação de forma subjetiva, pela observação em lupa binocular da quantidade de argila aderida aos grãos dos produtos da atrição. Grãos com argila aderida em cavidades rasas e profundas e com vestígios de película sobre o grão, conferindo opacidade, foram classificados como atrição regular. A presença de grãos com argila aderida apenas em algumas cavidades profundas, mas sem opacidade, possibilitou afirmar que a atrição foi boa. A atrição foi ótima quando os grãos estavam completamente liberados da argila e com superfícies brilhantes.

O resultado dos testes indica que a atrição atuou removendo as lamelas presentes no minério e melhorando o desempenho da flotação. Isso pode ser explicado pela efetividade da remoção das lamelas evidenciada pela presença de goethita, formando uma matriz micro porosa no minério do Tamanduá, contendo material terroso característico na jazida. E ainda, pela remoção de goethita que caracteristicamente circunda agregados de grãos de hematita e preenche cavidades e fraturas existentes e na forma de uma matriz goethita terrosa, contendo grãos de quartzo e de hematita na Mina de Capitão do Mato, conforme afirma Fernandes.⁽⁶⁾

4 CONCLUSÃO

O minério de ferro proveniente das minas Tamanduá e Capitão do Mato possuem características mineralógicas muito semelhantes por pertencerem ao mesmo grupo e formação geológica no Quadrilátero Ferrífero. Dentre as diversas formas de hematitas compactas, a presença de hematita porosa é relevante, principalmente devido à ocorrência conjunta da goethita terrosa. Comparada a outras minas do Sistema Ferrosos Sul da Vale, a Mina de Tamanduá apresenta uma característica peculiar: material terroso, portadoras de Al_2O_3 e algumas vezes, de Mn, junto com predominância de martita, intrinsecamente porosa. A massa terrosa ou lamelas, nessa circunstância, preenche as cavidades e/ou recobre o mineral.

A atrição proporciona a limpeza superficial, por desagregação e remoção de incrustações de argilas nas partículas do mineral. A atrição pode ser feita de diferentes formas dependendo do grau de dificuldade. Atualmente, tem-se aplicado industrialmente as células de atrição, equipamentos que promovem a limpeza das partículas por meio de intensa agitação. Trata-se da geração de fluxos de polpa em sentidos contrários dentro de tanques, causando o choque entre os grãos do mineral. As principais variáveis da etapa de atrição são o percentual de sólidos, tempo de agitação e grau de dispersão das partículas na polpa. A velocidade de rotação dos impelidores tem sido tratada como uma variável de projeto.

Testes em escala de bancada de deslamagem, atrição e flotação foram realizadas com amostra de alimentação da deslamagem em hidrociclones industriais. O teste realizado com a polpa atricionada por 10 minutos em meio disperso (pH 9,8) e deslamada, apresentou melhor recuperação metalúrgica e índice de seletividade no teste de flotação comparado ao teste com o material apenas deslamado em pH natural e flotado. A atrição seguida da deslamagem em meio disperso resultou no acréscimo de 17% na recuperação metalúrgica e 40% no índice de seletividade da flotação em relação à flotação da polpa apenas deslamada em pH natural.



Esse resultado mostra que a etapa de deslamagem não foi suficiente para remoção das lammas prejudiciais à flotação do minério de ferro. A atrição seguida da deslamagem em meio disperso mostrou-se um método adequado para remoção das lammas, que podem estar presentes nos poros e/ou encobrindo os grãos dos minerais.

Portanto, a combinação de elevado percentual de partículas porosas e minerais geradores de lammas nas Minas de Capitão do Mato e Tamanduá são um indício que a adoção de células de atrição no processo de beneficiamento industrial em Vargem Grande pode trazer ganhos consideráveis de recuperação metalúrgica e de seletividade na concentração por flotação e, conseqüentemente, melhor qualidade do produto final.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Vale, que possibilitou a realização desse trabalho; ao Ernades Sávio pela sugestão do tema da pesquisa; ao Fernando Pinto Coelho pela realização dos testes em laboratório e a todos que contribuíram com para maior conhecimento sobre o assunto.

REFERÊNCIAS

- 1 SOUZA, C. R. G.; FERNANDES, A. C. S. (Ed.) Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil. Disponível em: <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio042/sitio042.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2009.
- 2 OLIVEIRA, J. F. de. Flotação. In: FERNANDES, F. R. C.; MATOS, G. M. M. de; CASTILHOS, Z. C.; LUZ, A. B. da. Tendências Tecnológicas Brasil 2015: Geociências e Tecnologia Mineral. Rio de Janeiro: CETEM/ MCT, 2007. 104 - 156 p.
- 3 BALTAR, C. A. M. Flotação no Tratamento de Minérios. Recife: Departamento de Engenharia de Minas/ UFPE, 2008.
- 4 SANTOS, Pérsio de Souza. Tecnologia de argilas, aplicada às argilas brasileiras. São Paulo, Edgard Blücher, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1975.
- 5 PERES, Antônio Eduardo Clark; SALUM, Maria José Gazzi; VALADÃO, George Eduardo Sales; ARAÚJO, Armando Corrêa de. Métodos de Concentração. pp. 105-139. In: Introdução ao Tratamento de Minérios. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.
- 6 FERNANDES, E. Z. Caracterização Física, Química, Mineralógica e Metalúrgica dos Produtos Granulados de Minério de Ferro. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2008. 329 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).
- 7 ROSIÈRE, C. A.; CHEMALE, F. Jr. Itabiritos e minérios de ferro de alto teor do quadrilátero ferrífero – uma visão geral e discussão. Geonomos, Belo Horizonte, v.8, n.2, p. 27-42, 2000. Disponível em: www.igc.ufmg.br/geonomos/PDFs/8_2_27_43_Rosiere.pdf. Acesso em: 20 out. 2008.
- 8 VILELA, R. A. ; MELO, R. J.; COSTA, T. A. V. da; LAGOEIRO, L. E.; VARAJÃO, C. A. C. Petrografia do minério hematita compacta da Mina do Tamanduá (Quadrilátero Ferrífero, MG). REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto, 57(3): 157-164, jul, set. 2004.
- 9 DANA, J. D. Manual de Mineralogia. Rio de Janeiro: Livro Técnico S.A. e Editora da Universidade de São Paulo, 1969, v.2, p. 355-642.
- 10 QUEIROZ, L. A. Emprego da atrição na deslamagem: efeitos na flotação reversa de minérios itabiríticos. 2003. 117 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003. (Inédito)
- 11 SCHNEIDER, C. L.; ROCHA, V. A.; ABDEL-REHIM, M.A.; NEUMANN, R. Método expedito para medição de porosidade em partículas. In: Anais do XXI Encontro

- Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. 2 v. Natal: O2 Editora, 2005. pp. 41-46.
- 12 TAGGART, A. F. Handbook of Mineral Dressing: Ore and Industrial Minerals. Sydney: John Wiley & Sons, Inc., 1954.
 - 13 BULATOVIC, S. M. Handbook of flotation reagents: chemistry, theory and practice. 1st edition. pp.128-130. Netherlands: Elsevier Science & Technology, 2007. Disponível em:
[http://ktrungthuy.free.fr/SACHBOOKS/Handbook%20of%20Flotation%20Reagents,%20Elsevier%20\(2007\),%200444530290.pdf](http://ktrungthuy.free.fr/SACHBOOKS/Handbook%20of%20Flotation%20Reagents,%20Elsevier%20(2007),%200444530290.pdf) . Acesso em: 22 nov. 2009.
 - 14 SABEDOT, S.; SAMPAIO, C. H. Ensaios de atrição em pré-concentrado de zircão: um processo semipiloto. Revista da Escola de Minas. Vol. 55. nº 2. Ouro Preto. Abril/ 2002.
 - 15 CARLOS, M. O.; GARCIA J. R.; OLIVEIRA, I. R.; SALOMÃO, R.; PANDOLFELLI, V. C. Heterocoagulação como técnica para obtenção de cerâmicas porosas. Cerâmica, 51, pp.78-84, 2005. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ce/v51n318/25582.pdf>. Acesso em: 13 out. 2009.
 - 16 METSO Minerals. Manual de Britagem. 6ª ed. Publicação Técnica da Metso Mineral, 2005.
 - 17 ENGENDRAR. Disponível em: <http://www.engendrar.com.br/aplicacao.asp?paramCat=bene¶mID=51>. Acesso em: 17 set 2009.
 - 18 LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; MONTE, M. B. M.; ALMEIDA, S. L. M. Tratamento de Minérios. 3. ed. Rio de Janeiro: CETEM/ MCT, 2002.
 - 19 LUZ, A. B. da; LINS, F. A. F. Areia Industrial. Rio de Janeiro: CETEM, 2008. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2008-157-00.pdf>. Acesso em 24 out. 2009.
 - 20 ARAÚJO, R. V.; SOBRAL, L. G. S.; SANTOS, R. L. C. Produção de fosfato no Brasil: Complexo Mineração de Tapira / Fosfertil. XIX ENTMME. Perambuco: CETEM, 2002. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2002-050-00.pdf>. Acesso em: 14 out. 2009.
 - 21 BARROS, L. A. F. de. Relatório de Visita: Fosfertil - Fertilizantes Fosfatados S/A. Mina de Tapira. Araxá, 1996.
 - 22 VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. Introdução ao Tratamento de Minérios. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.