



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP
Escola de Minas
Departamento de Mineração – DEMIN
Campus Morro do Cruzeiro
Ouro Preto – Minas Gerais - Brasil



Aplicabilidade da atrição do minério de ferro na flotação

MONOGRAFIA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BENEFICIAMENTO MINERAL

Fabiana Fonseca Fortes

Ouro Preto

Janeiro de 2010

Fabiana Fonseca Fortes
ffonsecafortes@yahoo.com.br

Aplicabilidade da atrição do minério de ferro na flotação

Monografia apresentada ao Curso de Pós-Graduação Lato Senso em Beneficiamento Mineral da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do Grau de Especialista em Beneficiamento Mineral.

Orientador: Dr. Carlos Alberto Pereira

Ouro Preto
Janeiro de 2010

FOLHA DE APROVAÇÃO

Monografia aprovada, em 21 de fevereiro de 2010, pela comissão avaliadora
constituída pelos professores:

Prof. Carlos Alberto Pereira, Dr.

Universidade Federal de Ouro Preto

Prof.

Prof.

“Vulgar é o ler, raro o refletir. O saber não está na ciência alheia, que se absorve, mas, principalmente, nas idéias próprias, que se geram dos conhecimentos absorvidos, mediante a transmutação, por que passam, no espírito que os assimila.

Um sabedor não é armário de sabedoria armazenada, mas transformador reflexivo de aquisições digeridas. Já se vê quanto vai do saber aparente ao saber real. O saber de aparência crê e ostenta saber tudo. O saber de realidade, quanto mais real, mais desconfia, assim do que vai apreendendo, como do que elabora”.

Rui Barbosa

Ao meu marido, Fabiano, por seu amor.

Aos meus pais, Marcos e Elizabete Fortes, pelo incentivo e compreensão.

A minha irmã, Flávia, por sempre me ajudar.

Gostaria de expressar meus agradecimentos:

A presença de Deus ao meu lado.

Ao professor e orientador Carlos Alberto Pereira pela confiança e incentivo durante o desenvolvimento deste trabalho e outros anteriores.

Ao professor Antônio Clark Peres pelas sugestões

Ao Ieso Coutinho que viabilizou a realização da pós-graduação.

Ao ex-gerente Ernandes Sávio pela indicação do tema dessa monografia.

A Daniel Pitta Antipoff e Fernando Pinto Coelho pela realização dos testes laboratoriais.

Ao Sérgio Coutinho pelos ensinamentos.

A todos os professores e amigos da pós-graduação.

Aos amigos da Vale pela prontidão e ensinamentos.

A Universidade Federal de Ouro Preto pela estrutura.

A ABM pela iniciativa.

A todos do Departamento de Engenharia de Minas.

A Vale que viabilizou o desenvolvimento acadêmico.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a finalização deste trabalho.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é investigar a possibilidade de aumentar a recuperação metalúrgica na flotação do minério de ferro, com a implantação de uma etapa de atrição seguida de dispersão. Os minérios em questão provem de duas minas localizadas na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero, e se diferenciam, principalmente, com relação ao percentual de hematita compacta e porosa e a presença de agregados terrosos. Tais características foram comparadas às ~~características~~ de outros minérios que obtiveram sucesso com a adoção dessa técnica. Foram realizados testes em escala de bancada de atrição, deslamagem e concentração por flotação com o *blend* do minério de ambas as minas. Variou-se o tempo de agitação e o pH. Os resultados químicos da alimentação e dos produtos da deslamagem e da flotação nas diferentes condições foram comparados. A presença de hematita porosa é relevante em uma das minas, principalmente devido à ocorrência da goethita terrosa, portadora do contaminante alumina. A etapa de deslamagem é insuficiente para a remoção das lamas prejudiciais na flotação. Experimentos laboratoriais mostraram que a atrição da polpa de minério de ferro das Minas de Capitão do Mato e Tamanduá, agitada por 10 minutos, seguida de deslamagem em meio disperso, promove o aumento da recuperação metalúrgica em cerca de 17% e aumenta a seletividade em 40% comparado aos resultados do processo sem atrição e dispersão. A atrição desse minério hematítico seguida da deslamagem em meio disperso pode trazer ganho no aumento da qualidade do *pellet feed fine* se implantada industrialmente.

Palavras-chave: Atrição, Flotação, Minério de Ferro.

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the possibility to increase metal recovery in the flotation of iron ore with the implementation of a stage of scrubbing followed by dispersion. The minerals in question stems from two mines located in the western portion of the Iron Quadrangle and differ mainly with respect to the percentage of hematite and porous and the presence of aggregated masses. These characteristics were compared to those of other minerals that have succeeded with the adoption of this technique. Tests were conducted at bench scale scrubbing, deslamagem and concentration by flotation with the blend of ore from both mines. Were varied stirring time and pH. The chemical results of deslamagem and flotation products in the different conditions were compared. The presence of porous hematite is relevant in a mine, mainly due to the occurrence of earthy goethite, alumina carrier of the contaminant. The step deslamagem is insufficient for the removal of harmful sludge flotation. Laboratory experiments showed that the scrubbing of the pulp of iron ore of Minas de Capitão do Mato and Tamanduá, agitated for 10 minutes followed by deslamagem amid scattered, promotes increased metal recovery by about 17% and increases the selectivity of 40 % compared to the results of the scrubbing and without dispersion. The scrubbing of hematite ore followed by deslamagem amid scattered can bring gains in improving the quality of pellet feed fine if deployed industrially.

Key words: Scrubbing, Flotationb and Iron Ore.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	CARACTERÍSTICAS DO MINÉRIO DE FERRO.....	3
3	ATRIÇÃO.....	11
	3.1. <i>Equipamentos de Atrição.....</i>	13
	3.2. <i>Aplicações da atrição.....</i>	17
	3.3. <i>Variáveis do processo de atrição.....</i>	19
4	DISPERSÃO E COAGULAÇÃO.....	21
5	METODOLOGIA.....	29
	5.1. <i>Coleta da Amostra.....</i>	29
	5.2. <i>Testes Exploratórios.....</i>	30
	5.3. <i>Ensaio de Flotação.....</i>	30
	5.4. <i>Ensaio de Deslamagem.....</i>	31
	5.5. <i>Ensaio de Atrição.....</i>	32
	5.6. <i>Desempenho da Flotação.....</i>	32
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	34
	6.1. <i>Amostra de Alimentação dos Ensaios.....</i>	34
	6.2. <i>Resultado dos testes.....</i>	34
7	CONCLUSÃO.....	38
8	RECOMENDAÇÕES DE PESQUISAS FUTURAS.....	40
9	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	41

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Principais jazidas na Sinclinal de Moeda.	4
Figura 2: Exemplos de porosidade no minério de ferro de Tamanduá	8
Figura 3: Exemplos de porosidade no minério de ferro de Capitão do Mato.....	8
Figura 4: Equipamentos para atrição de material granulado	14
Figura 5: Tambor de Atrição	14
Figura 6: Equipamentos para atrição de material fino	15
Figura 7: Lavador de material.....	16
Figura 8: Célula de atrição industrial	16
Figura 9: Circulação da polpa em célula de atrição	17
Figura 10: Modelo dupla camada elétrica na superfície de um sólido.....	22
Figura 11: Alteração do potencial eletrocinético da hematita pela adição de NaOH	24
Figura 12: Alteração do potencial zeta da hematita pela adição de íons não determinantes	25
Figura 13: Teoria DLVO clássica: curvas de energia de interação em função da distância de aproximação mútua de duas partículas.	26
Figura 14: Ponto de coleta da amostra	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Percentual de hematita porosa	7
Tabela 2: Comparação das características do minério de alimentação da ITM VGR.....	9
Tabela 3: Teores na amostra	34
Tabela 4: Resultado do teste 1	34
Tabela 5: Resultado do teste 2	35
Tabela 6: Resultado do teste 3	35
Tabela 7: Resultado do teste 4	36
Tabela 8: Resumo dos testes exploratórios.....	36

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. A flotação desempenhou um papel fundamental para o crescimento da indústria mineral, principalmente o segmento de minério de ferro no Brasil (OLIVEIRA, 2007). 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 (SOUZA, 2005), o que não é alcançado nos processos físicos tradicionais baseados nas propriedades naturais dos minerais. Para Oliveira (2007), 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 (OLIVEIRA, 2007). A simples presença de partículas ultrafinas também influencia negativamente no processo de flotação. Baltar (2008) aponta como efeitos nocivos para o processo de 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. Como consequência, a recuperação metalúrgica diminui, os custos de produção são onerados e maior volume de rejeito é gerado, com maior potencial de impacto ambiental, o que está na contramão de “uma tendência mundial de melhoria da ecoeficiência, ou seja, obtenção de resultados econômicos em paralelo à obtenção de ganhos ambientais (...) e que também se verifica no setor mineral” (SÁNCHEZ, 2008, p. 194).

Por outro lado, uma *commodity* diferencia-se por seu custo e, no caso específico do minério de ferro brasileiro, além desse fator, diferencia-se pela qualidade, representada pelos teores de ferro e seus contaminantes. O cenário econômico estabelecido após a

recessão mundial no quarto trimestre de 2008 forçou as empresas do setor a buscar formas de maximizar seus resultados, ou seja, menor custo de produção e manutenção da qualidade do produto. A Vale, segunda maior empresa do setor de mineração, por exemplo, manifestou a intenção de interromper a produção de minério de baixa concentração e fechar unidades de produção de alto custo (MOREIRA, 2009). É com a intenção de atingir a “ecoeficiência” que surge a necessidade de aumentar a recuperação metalúrgica no processo de concentração por flotação na maior instalação de tratamento de minério de ferro do Sistema Sul da Vale.

Tradicionalmente, os finos, prejudiciais à flotação, 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 investigar as possibilidades de aumento da recuperação metalúrgica na flotação reversa do minério de ferro na Instalação de Tratamento de Minério de Vargem Grande depois da inserção da etapa de atrição da polpa de alimentação da flotação após deslamado.

Em princípio, é necessário descrever as características do minério que deverá ser concentrado por flotação. Conhecer quais as características mineralógicas pode anunciar a necessidade da atrição para remoção de lamas que recobrem as partículas de hematita e/ou ganga.

Os principais equipamentos utilizados para atrição em escala industrial serão apresentados, assim como as variáveis de controle da atrição.

Somente então, será avaliado quantitativa e qualitativamente o caso da recuperação metalúrgica na flotação na Instalação de Tratamento de Minérios de Vargem Grande, apontando as possibilidades de melhoria.

2 CARACTERÍSTICAS DO MINÉRIO DE FERRO

As minas do Sistema Sul da Vale pertencem ao Quadrilátero Ferrífero e distam, em média, 50 km da cidade de Belo Horizonte (Fernandes, 2008). O Quadrilátero Ferrífero é um dos mais importantes distritos de mineração de ferro do mundo. Os grandes depósitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero estão localizados nos sedimentos de plataforma do Supergrupo Minas, englobando seqüências metamórficas.

Por sua vez, o Supergrupo Minas inclui quatro grupos: Caraça, Itabira, Piracicaba e Sabará (Dorr 1969 apud Rosière et al, 2000). No Grupo Itabira, encontra-se “a seqüência mais espessa de formações ferríferas bandadas com corpos de minério de alto teor economicamente exploráveis, constituído por itabiritos, dolomitos e, subordinadamente, metapelitos” (Rosière et al, 2000). Trata-se de rochas sedimentares químicas, que ocorrem junto com filitos dolomíticos e hematíticos, margas e dolomitos, abrangendo a Formação Cauê (Babinsky et al., 1995 apud Fernandes, 2008).

O Grupo Itabira é dividido em uma unidade inferior, a Formação Cauê onde predomina itabiritos, e uma superior, a Formação Gandarela com rochas carbonáticas, filitos e formações ferríferas bandadas. Porém não existe uma nítida separação entre elas, e dolomitos e itabiritos ocorrem intercalados (Rosière et al, 2000). As minas de Capitão do Mato e Tamanduá, pertencentes ao Sistema Sul da Vale, estão localizadas na porção oeste do Quadrilátero Ferrífero na Formação Cauê do Grupo Itabira.

O Quadrilátero Ferrífero é caracterizado pelo arranjo grosseiramente quadrangular de sinclinais, que pode ser classificado segundo os domínios leste, de alta tensão, e oeste, de baixa tensão. O grau de metamorfismo aumenta progressivamente da porção oeste para leste do Quadrilátero Ferrífero e é evidenciado pelo aumento do tamanho dos grãos de quartzo. Contudo, nos domínios de baixa tensão, encontram-se preservadas várias feições sedimentares e diagenéticas¹ (Rosière et al, 2000). As minas em questão estão em uma das sinclinais do Quadrilátero, no flanco leste do Sinclinal de Moeda (Rosière et al., 2005) conforme ilustrado na figura 01.

¹ Em geologia e oceanografia, diagênese é qualquer produto químico, físico ou mudança biológica sofrida por um sedimento após a sua deposição inicial.

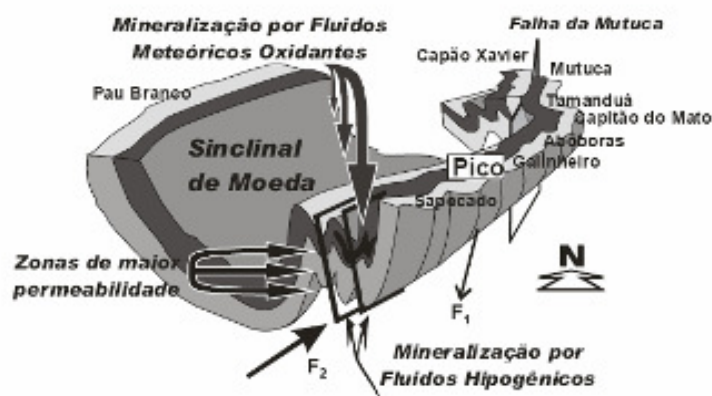


Figura 1: Principais jazidas na Sinclinal de Moeda.

Fonte: ROSIÈRE et al., 2005.

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 meteoricos oxidantes (Rosière et. al, 2005). Processo de enriquecimento dessa natureza resultou em depósitos de minério de ferro em todo o Quadrilátero Ferrífero com alto teor (acima de 62% de ferro) e baixo teor (de 32% a 62% de ferro) (Fernandes, 2008). Rosière et al (2000) consideraram relativamente “monótona” a seqüência de itabiritos no Quadrilátero Ferrífero, sendo hematita o óxido predominante sob diferentes formas e o quartzo o mineral de ganga predominante, além de dolomita e anfibólios (grunerita, tremolita, actinolita, cummingtonita, antofilita).

A composição acima permite a definição dos três tipos composicionais principais: quartzo-itabirito, itabirito dolomítico e itabirito anfibolítico. Segundo Fernandes (2008, apud Rosière et al., 1993), o principal tipo de itabirito do Quadrilátero Ferrífero é o quartzo-itabirito. O quartzo-itabirito tem como principais componentes mineralógicos hematita, martita, kenomagnetita e quartzo e com componentes acessórios clorita, sericita, dolomita ferroana, caulinita, cianita, óxidos de Mn, sulfetos, apatita, pirofilita (Rosière et al, 2000).

Na Mina do Tamanduá, situada no Sinclinal Tamanduá, que é uma dobra de segunda ordem do Sinclinal de Moeda (figura 1), Vilela et al. (2004) identificaram minérios bandados formados pela alternância de martita e hematita e minérios hematíticos com nítida xistosidade. Dana (1969, p. 584) definiu xistosidade como sendo a “presença da disposição em lâminas [quartzo ou mica] (...) ao longo da qual a rocha pode ser quebrada facilmente”.

Fernandes (2008) completa a caracterização da jazida afirmando que:

O corpo de minério do Tamanduá é composto por minério macio e, secundariamente, por lentes de minério hematítico compacto. O corpo de minério é circundado por litologias impermeáveis como filitos, diques intermediários a básicos, os quais favoreceram o enriquecimento supergênico (Fernandes, 2008, p.29).

O minério hematítico friável é o tipo mais comum na Mina do Tamanduá e corresponde em massa cerca de 60 a 70% do total. A porção de minério compacto na mina é composto por corpos de hematitas compactas ou porosas. No minério maciço, predomina uma “fina fábrica granoblástica² porosa”, com hematita lobular, granular e martita. Cristais de kenomagnetita, hematita tabular e especularita são raros. A kenomagnetita é uma variedade de magnetita deficiente em Fe²⁺, fases magnéticas metaestáveis entre a composição dos minerais magnetita e maghemita. (Fernandes, 2008). A definição de hematitas lobular, granular, tabular e especularita dizem respeito à forma do cristal de hematita. A martita é uma hematita com hábito de magnetita geralmente porosa (Souza, 2005).

Vilela et al. (2004) dividiram os minérios na Mina do Tamanduá em três domínios com base na composição mineralógica, textura e macro/microestruturas. Nestes domínios, estão a martita e martita com núcleo de kenomagnetita com bandas ricas em hematita tabular que conduzem a diferentes susceptibilidades magnéticas.

A Mina de Capitão do Mato está localizada no eixo leste do Sinclinal Moeda, a aproximadamente 3 km 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. Os contatos litológicos são usualmente falhados, com brechas localizadas (Fernandes, 2008), constituídas de fragmentos de hematita compacta ou itabirito em matriz de quartzo, carbonato ou hematita (Rosière et al, 2000).

O minério compacto é composto por cristais de hematita granular (em torno de 80%), desenvolvidos sobre agregados martíticos (10%), parcialmente arredondados pela especularita, que cresceu nos interstícios (10%). Os cristais de hematita granular são muito finos (0,01 – 0,03 mm). A xistosidade é caracterizada por hematita tabular e especularita, com 0,02 a 0,05 mm (70 a 80%), envolvendo agregados porfiroclásticos³ de hematita granular (20%). O mineral kenomagnetita porfiroclástica

² Granoblástica: diz respeito à textura.

³ Porfiroclástica: diz respeito à textura.

parcialmente martitizada, é uma feição comum, com cristais acima de 0,15 mm de diâmetro. (Fernandes, 2008, p. 29).

Segundo Fernandes (2008), 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 magnetíticas, a goethita e limonita estão presentes (Fernandes, 2008). A goethita, um dos minerais portadores de ferro, que 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. (Dana, 1969).

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 é considerada como sendo $\text{Al}(\text{OH})_3$, com 62,8 a 65,3% de Al_2O_3 e 31,8 a 34,12% de perda ao fogo. O termo argila é empregado para designar material terroso, de granulação fina, que se torna plástico ao ser misturado com quantidade pequena de água. Porém, argilo-minerais são argilas constituídas, essencialmente, silicatos de alumínio hidratados, algumas misturadas com feldspato, quartzo, carbonatos e micas. (Dana, 1969).

Goethita terrosa, caulinita e gibbsita são as principais geradoras de lamelas. As lamelas 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. (2005 apud Araújo, 1982) afirma que as lamelas constituídas por apenas caulinita são tão prejudiciais para a flotação do quartzo com eteramina quanto as lamelas 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. Fernandes (2008) quantificou a ocorrência de partículas porosas na

assembléia mineralógica dos granulados em Tamanduá e Capitão do Mato, conforme apresentado em resumo na tabela 2.

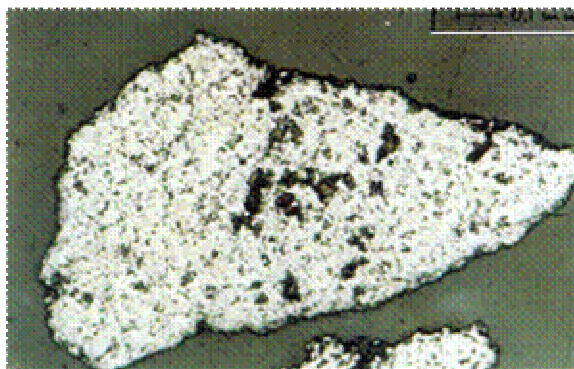
Tabela 1: Percentual de hematita porosa

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

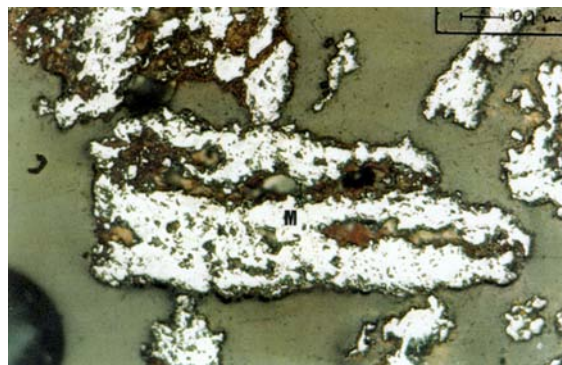
Fonte: Fernandes, 2008.

Schneider et al. (2005) 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. A explicação para a existência comum dos poros pode estar nos contatos entre bandas ricas em martita 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. (Vilela et al., 2004).

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 (Schneider et al., 2005). Uma partícula pode ter poros interconectados ou poros isolados (figura 2 e 3). Queiroz et al. (2005) afirmam que o minério de ferro com predominância de hematita martítica com pequenas conexões entre seus microporos tendem a apresentar bons resultados na deslamagem, enquanto hematita martítica mais porosa é menos favorável para a deslamagem.



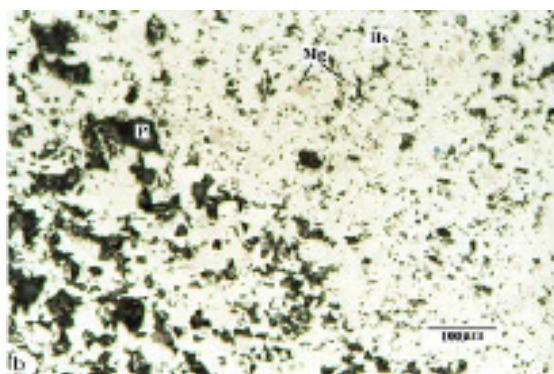
Martita com baixa porosidade



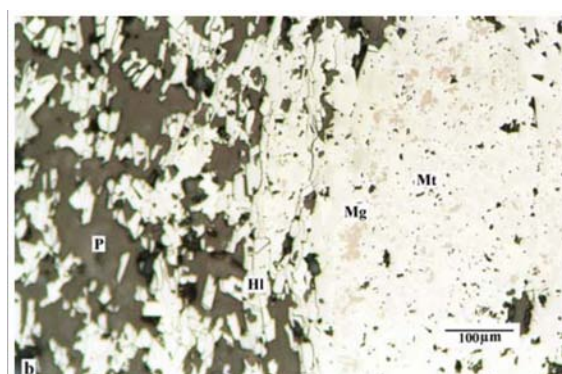
Hematita Compacta com porosidade interconectada

Figura 2: Exemplos de porosidade no minério de ferro de Tamanduá

Fonte: Mineralogical Studies: MBR Ores, 2001.



Hematita Compacta com relictos de magnetita e poros



Hematita Compacta com pouca porosidade, martita e magnetita relictual

Figura 3: Exemplos de porosidade no minério de ferro de Capitão do Mato

Fonte: Fernandes (2008, p.255)

Fernandes (2008) comparando os minérios granulados do Tamanduá e Capitão do Mato chega às seguintes conclusões:

- as minas apresentam proporção semelhante de hematita granular;
- a quantidade de hematita lamelar é maior em Tamanduá;
- Capitão do Mato apresenta percentual significativamente superior de hematita sinuosa que Tamanduá;

- o percentual de martita em Tamanduá é ligeiramente maior que em Capitão do Mato e inferior a 10%;
- a quantidade de magnetita em ambas as minas é inferior a 5%;
- não há ocorrência de hematita microcristalina, jacobsita, quartzo ou gibbsita nas partículas;
- a goethita está presente em maior proporção no minério de Tamanduá e é inferior a 10%;
- agregados terrosos fazem parte na composição do minério de Tamanduá.

A goethita está presente com variadas feições micro estrutural e associações variadas, formando uma matriz micro porosa no minério do Tamanduá. Nesses poros, pode existir material terroso característico na jazida. Na Mina de Capitão do Mato, a goethita também está presente circundando agregados de grãos de hematita e preenchendo cavidades e fraturas existentes e ainda na forma de uma matriz goethita terrosa, contendo grãos de quartzo e de hematita. (Fernandes, 2008).

A proporção no ROM lavrado em 2009 proveniente das minas do Tamanduá e Capitão do Mato é semelhante, respectivamente 49% e 51%. A tabela 3 apresenta os teores nas frações granulométricas do ROM britado.

Tabela 2: Comparação das características do minério de alimentação da ITM VGR

Fração	Mina Capitão do Mato				Mina Tamanduá			
	50 - 31,5 mm	31,5 - 6,3 mm	6,3 - 0,15 mm	- 0,15 mm	50 - 31,5 mm	31,5 - 6,3 mm	6,3 - 0,15 mm	- 0,15 mm
Massa	4%	35%	31%	30%	5%	32%	36%	27%
Fe	66,55	66,37	66,24	59,78	68,15	67,86	67,39	60,95
SiO ₂	2,70	2,33	2,55	9,71	1,30	1,45	1,99	6,62
Al ₂ O ₃	1,02	1,26	1,21	2,37	0,47	0,60	0,58	2,44
P	0,039	0,048	0,066	0,072	0,025	0,023	0,021	0,065
Mn	0,026	0,029	0,043	0,053	0,049	0,091	0,149	0,643
Fechamento Químico	99,0%	98,6%	98,7%	97,8%	99,3%	99,2%	99,1%	97,2%

Fonte: Vale, 2009.

A maior parte do minério, 70%, está na fração acima de 0,15 mm na Mina do Tamanduá depois da britagem, enquanto na Mina do Capitão do Mato esse percentual é ligeiramente

superior e igual a 73% do total lavrado em 2009. O teor de ferro na fração acima de 0,15 mm é ligeiramente superior na Mina do Tamandua. A fração fina (-0,15 mm) possui teores de contaminantes (Al_2O_3 , SiO_2 e P) muito parecidos com exceção do teor de Mn, muito superior na Mina do Tamandua. Essa disparidade, em parte, pode ser explicada pela presença de materiais terrosos. A variabilidade dos teores e granulometria do ROM são amenizadas pelo processo de homogeneização em pilha chevron.

A proximidade física entre as minas Tamandua e Capitão do Mato no mesmo grupo e formação geológica dentro do Quadrilátero Ferrífero fizeram com que suas características fossem muito semelhantes, diferenciando apenas por ocorrências geológicas pontuais, tais como falhas. Sendo assim, às características mineralógicas do minério de ferro também são semelhantes, o que pode ser notado, sobretudo, a partir da comparação entre os teores de Fe e contaminantes no ROM lavrado. As hematitas compactas estão presentes em algumas de suas diversas formas (granular, lobular e martita). A presença de hematita porosa é relevante, principalmente devido à ocorrência conjunta da goethita terrosa, portadora do contaminante alumina em ambas as minas. Merece atenção especial neste trabalho a existência peculiar dentre as minas do Sistema Sul da Vale, de material terroso na Mina do Tamandua junto com predominância de martita, intrinsecamente porosa. A combinação de alto percentual de partículas porosas e minerais geradores de lamelas justificam a investigação da aplicabilidade da etapa de atrição no processo de beneficiamento atual. Se a etapa de deslamagem não é eficiente na remoção dessas lamelas e se as lamelas são prejudiciais a concentração por flotação, faz-se mister verificar quais são as tecnologias disponíveis para remoção das lamelas que impedem a recuperação e qualidade do produto adequados na flotação.

3 ATRICÃO

O processo para remoção das lamas, prejudiciais à flotação, depende do tipo de lamas e estão presentes em relação ao mineral de interesse ou à ganga. As lamas, também designadas como argilas ou argilominerais, são definidas por Santos (1975; p.1) 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 (Santos, 1975). Talvez por esse motivo não haja consenso quanto à faixa granulométrica das lamas.

Santos (1975) 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. (2007) 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 contém as partículas de menores diâmetros, que podem vir a prejudicar o processo de beneficiamento de alguma forma.

As argilas são compostas por argilominerais, minerais e outros materiais (matéria orgânica). Os argilominerais, por sua vez, são constituídos por silicatos hidratados de alumínio e ferro, além de conter traços de elementos alcalinos e alcalino-terrosos. Partículas de quartzo, calcita, dolomita são exemplos de minerais que podem ser encontrados nas argilas. (Santos, 1975). Segundo Queiroz (2003), a goethita terrosa, caulinita e gibbsita são geradores de lamas no minério de ferro e podem aderir à superfície dos minerais de ferro e do quartzo ou hospedados 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 (Bulatovic, 2007). Dependendo do pH do meio, cargas opostas das partículas do mineral e das lamas são atraídas. Queiroz (2003) 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 (2002) 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 (Queiroz, 2003). 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 (Garcia et al, 2005). Assim, cristais compactos seriam suscetíveis ao fenômeno *slime coating* e minérios porosos à presença de lamas em suas cavidades.

A presença de poros nos cristais de minerais de ferro é resultante “de ambientes geológicos de maior hidratação, onde massas terrosas estão presentes em maior freqüência, sendo as cavidades e as fraturas do quartzo preenchidas ou recobertas por estas massas terrosas” (Queiroz, 2003, p.84). As massas terrosas são portadoras de Al_2O_3 e algumas vezes, de Mn, contaminantes do minério de ferro.

Silva et al (2001) mostraram que os maiores teores de Al_2O_3 estavam concentrados na fração abaixo de 9 μm na alimentação da flotação do Pico (Minerações Brasileiras Reunidas), e a quase totalidade dessas lamas foram removidas no estágio de deslamagem. Foram identificadas a presença de material terroso (caulinita e gibbsita) e goethita cimentando grãos de hematita fina, recobrimdo grãos lamelares de hematita grossa ou, até mesmo, associada à hematita com microporosidade. No caso no Pico, a deslamagem era suficiente para garantir condições de recuperação mássica e seletividade da flotação. Em outros casos, é necessária a dispersão e a atrição do minério antes da deslamagem (Queiroz, 2003; Sabedot e Sampaio, 2002).

A atrição ou “scrubagem” (do inglês, *scrubbing*)

“é 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”⁴ (TAGGART, 1954, p. 10-1, tradução nossa).

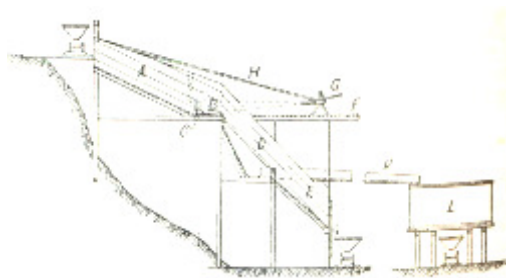
A atrição seria um processo de limpeza por desagregação de argilas dos minerais, podendo ser feita de diferentes formas dependendo do grau de dificuldade. Quando a atrição objetiva remover também incrustações de argilas nas partículas dos minerais aplica-se o termo *scuffing* (TAGGART, 1954).

3.1. Equipamentos de Atrição

Existem alguns tipos de equipamentos cuja finalidade é promover a remoção de argilo-minerais ou simplesmente lamas do minério. O método mais adequado deve ser selecionado em função do material. Taggart (1954) classifica os materiais a serem atricionados em: granular, cimentado e recoberto.

O material granular é aquele que possui grãos compactos e estão dispersos em uma matriz de argila ou argilo-mineral. O material cimentado é aquele no qual as partículas predominantes são compactas, mas nas quais existe suficiente massa “terrosa” entre os grãos preenchendo os espaços. Para estes dois tipos de material, a atrição por jateamento de água pode ser aplicado para remoção de lamas. (TAGGART, 1945). O jateamento pode ser feito sobre uma superfície inclinada por onde corre o material (figura 4). Os equipamentos e processos de lavagem nas instalações industriais de britagem e classificação têm a finalidade, dentre outros, de remover materiais indesejáveis (argilas). 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 (METSO, 2005). No entanto, a desintegração de material agregado em uma *screen scrubber* é menos efetiva que nos tambores de atrição que serão descrito a seguir (TAGGART, 1945).

⁴ *Scrubbing is disintegration effected by forces which are relatively light, judged by ordinary standards of comminution, but are sufficient to break down soft unconsolidated material such as clay, or to sever the bonding brought between grains by precipitates of salt and the like. Scrubbing is usually effected by rubbing the larger and harder grains together, as by tumbling the mass, but in some cases the force of a water jet playing against a mass of crude backed by a rigid surface is sufficient. (Taggart, 1954, p.10-1)*



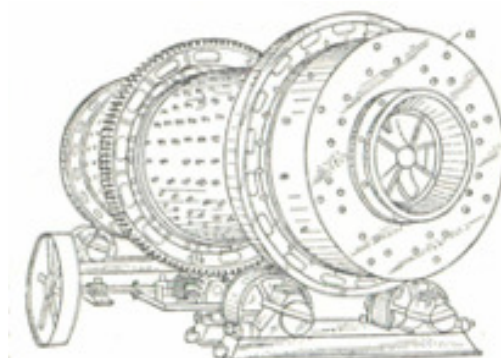
Planta de Jateamento



Lavagem na Peneira

Figura 4: Equipamentos para atrição de material granulado**Fonte:** TAGGART, 1945 e METSO, 2005

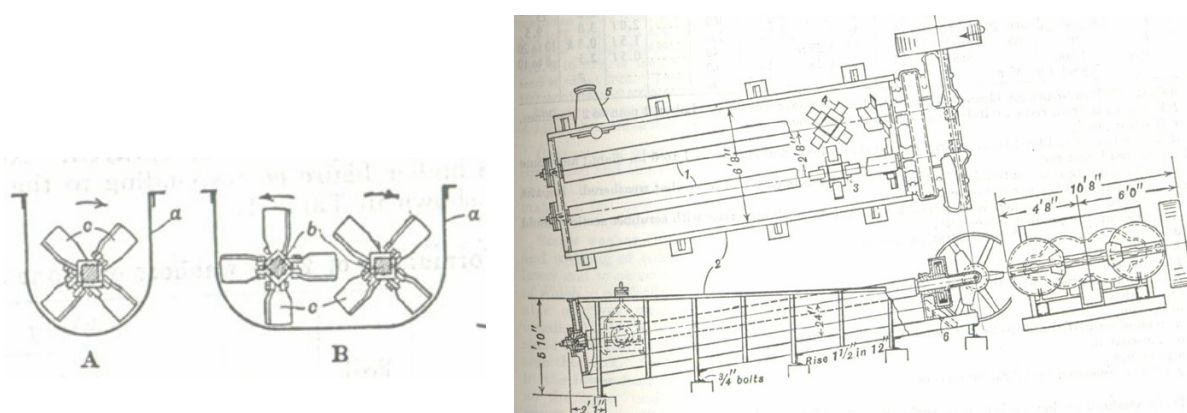
A atrição por abarroamento pode ser aplicado para material granulado com tamanho variando de 2 a 12 polegadas. O abarroamento pode ser feito em diferentes tipos de equipamentos com o mesmo princípio de funcionamento do tambor de atrição apresentado na figura 5. Porém, para alguns materiais, apresenta 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.

**Figura 5:** Tambor de Atrição**Fonte:** TAGGART, 1945

O tratamento do material de menor granulometria com recobrimento de lamelas pode ser realizada em equipamentos que promovam a agitação. Taggart (1945) menciona duas

classes de equipamento para agitação desse tipo de material: *pug mill* e *log washer*, mostrados na figura 6.

O primeiro, *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 a 0,9 metros dependendo da sua função e a rotação varia entre 10 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. No equipamento B, mostrado na figura 6 (a), observamos que as hélices têm rotações contrárias, a exemplo das atuais células de atrição.



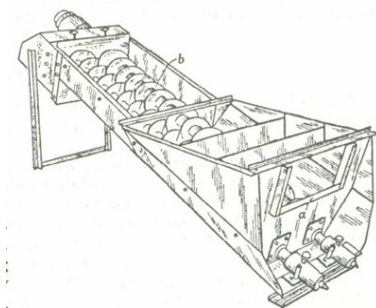
(a) *Pug Mill*

(b) *Log washer*

Figura 6: Equipamentos para atrição de material fino

Fonte: TAGGART, 1945

O segundo, o *log washer*, tem duas funções: i) desintegrar as lamas e ii) separar os finos do material granuloso. O *log washer*, em sua versão *screw washer*, se assemelha a um lavador de rosca, como mostrado na figura 7. O lavador de rosca se destina à lavagem de partículas finas (abaixo de 10 mm) para remoção de superfinos e desaguamento (METSO, 2005). Segundo Taggart (1945), o *log washer* pode ser alimentado com granulometrias abaixo de três polegadas e promover a atrição mais intensa que o um *screw washer*.

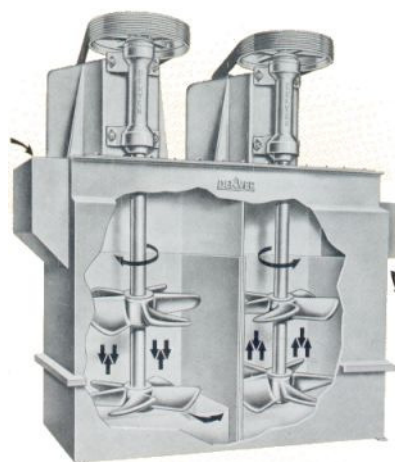
*Screw washer*

Lavador de rosca

Figura 7: Lavador de material

Fonte: TAGGART, 1945 e METSO, 2005

A célula de atrição, mencionada anteriormente, consiste basicamente em tanques retangulares conectados com agitadores verticais centrados com alimentação de polpa pelo topo (figura 8). Esse equipamento promove a lavagem e limpeza das partículas por meio de intensa agitação entre as próprias partículas do material. Em cada célula, existem dois impelidores de pás perfiladas de alta eficiência, denominadas hidrofoil. Os impelidores, em conjunto, atuam produzindo fluxos em sentidos contrários. (ENGENDRAR, 2009). Luz et al. (2002, p. 423) explica 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”.

**Figura 8:** Célula de atrição industrial

Fonte: DARMA, 2009

Industrialmente, duas ou quatro células em série podem ser usadas, como mostrado na figura 9. A primeira célula descarrega por baixo, a segunda por cima e assim sucessivamente, de modo a aumentar o tempo de permanência das partículas no equipamento.

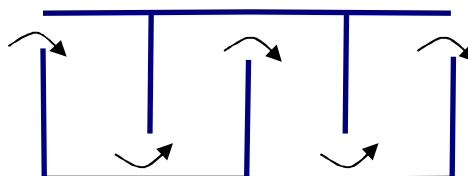


Figura 9: Circulação da polpa em célula de atrição

Fonte: Adaptado de Luz, 2002.

Conforme exposto, a atrição para remoção do *slime coating* e/ou de incrustações nos grãos do minério pode ser feita por diferentes métodos usando diferentes equipamentos. Em seguida, serão investigadas as aplicações mais recentes da atrição, especialmente no Brasil.

3.2. Aplicações da atrição

Taggart (1945) cita a aplicação de moinho de barras ou bolas com carga mais leve para atrição (ou “scrubagem”) de hematita e fosfato; assim como o *chaser mill*⁵ para areias para fabricação de vidros; e agitação vigorosa da polpa densa em um tanque na presença de um dispersante, para prevenir uma nova deposição de argilas na superfície dos minerais em geral.

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

⁵ *Chaser mill* é um tipo de moinho com corpos moedores de blocos de madeira e rotação entre 15 e 30 rpm.

em hidrociclones, peneiramento, desaguamento em hidrociclones e secagem do produto final. O objetivo desse conjunto de operações unitárias é reduzir o teor de ferro, bastante crítico na fabricação de um vidro branco ou cristal. No entanto, a atrição não é suficiente para remoção dos minerais pesados (zircão, ilmenita, magnetita, cromita, etc) ou do recobrimento superficial de lamas dos grãos de quartzo. A flotação em meio ácido é aplicada para remoção dos metais pesados e a lixiviação a quente, com ácido sulfúrico, é mais eficiente para limpar a cobertura ferrosa das partículas de areias especiais. (Luz e Lins; 2008).

A atrição também é aplicada nos estágios que antecedem a flotação nos circuitos de grossos e finos do fosfato na Fosfértil. 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. (Araújo et al.; 2002).

Sabedot e Sampaio (2002) atestaram, 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 (2003) 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, geradas por duas hélices invertidas, acopladas em um eixo.

Em todos os exemplos citados, a atrição em células para a limpeza superficial é sugerida ou aplicada. A finalidade nestes casos era adequar o material para ser concentrado, 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.

3.3. Variáveis do processo de atrição

A limpeza superficial do minério na Fosfértil 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 estes dois aspectos bastante significativos para a resposta da flotação na Fosfértil, 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. (Barros, 1996).

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, 500, 600 g/t e nula; tempo de agitação de 10, 20, 30 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 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. (Sabedot e Sampaio, 2002).

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 e 20 minutos. A rotação foi fixada em 800 rpm. O percentual de sólidos fixado em 40%. Queiroz (2003) 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 influenciou 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%.

Os parâmetros mais adequados para a atrição foram selecionados em função da eficiência na remoção das lamelas das partículas minerais. Trata-se da comparação da quantidade de lamelas antes e depois da atrição. A quantificação pode ser feita por análise química ou análise mineralógica.

Sabedot e Sampaio (2002) 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.

Uma segunda quantificação possível é através de análise química do produto da atrição antes e depois da etapa de concentração, com a finalidade de medir a redução do teor de contaminantes no produto final. Sabedot e Sampaio (2002) e Queiroz (2003) basearam-se nesse método para concluir a respeito da efetividade da atrição. Queiroz (2003) mediu, principalmente, os teores de Fe, SiO₂ e Al₂O₃, para verificação dos indicadores de performance no processo de concentração. Sabedot e Sampaio (2002) mediram todos os contaminantes do pré-concentrado de zircão, no entanto, constataram que o método mostrou-se inadequado. Isso porque as diferenças entre os teores da maioria dos contaminantes antes e depois da atrição foram valores considerados coincidentes com os da "margem de erro" do processo analítico.

Vistos os exemplos de atrição dos minérios de fosfato, zircão e ferro, pode-se afirmar que sua eficácia depende do grau de dispersão da polpa, tempo de residência do minério na célula de atrição, percentual de sólidos na polpa e, bem menos da rotação do agitador. Nos três casos mencionados, a rotação aplicada foi fixa e mínima de 73 rpm, em aplicação industrial recentes, e máxima de 1.000 rpm, em teste em escala piloto. A rotação será uma variável importante no que diz respeito à potência absorvida pelo sistema (Botelho, [ca. 2009]). Apesar de sua importância, ela não será abordada neste estudo. A dispersão, no entanto, é relevante quando se trata da remoção das lamelas, quer na condição de *slime coating*, quer na forma de incrustações em partículas porosas e será abordada em capítulo específico.

4 DISPERSÃO E COAGULAÇÃO

A dispersão é uma condição importante para remoção das lamas aderidas às partículas dos minerais submetidos ao processo de flotação. Partículas coloidais tendem a se depositarem na superfície de partículas maiores ou formar agregados entre si (Baltar, 2008). A eficácia da atrição dos minérios de fosfato, zircão e ferro, dentre outros, depende da condição de dispersão dos minerais (Barros, 1996; Sabedot e Sampaio, 2002; Queiroz, 2003). As partículas sólidas têm a tendência de interagirem com íons de oxigênio da água e adquirem uma carga elétrica superficial (Coelho, 2009), podendo apresentar um excesso de carga positiva ou negativa. Essa reação química ocorre mais facilmente em meio aquoso porque o oxigênio dissolvido em água tem maior atividade que o oxigênio na fase gasosa, devido à presença de formas atômicas e iônicas de oxigênio O e O⁻² (Pereira, 2004 apud Glembotski, 1972).

Baltar (2008 apud Shaw, 1970; Lyklema, 1978; Everett, 1988) descreve três diferentes mecanismos que contribuem para o surgimento desse excesso de carga na superfície de um mineral: cristais iônicos, hidratação da superfície e substituição isomórfica.

Os cristais iônicos são formados quando em contato com um líquido polar, como a água, espécies iônicas da superfície do mineral sólido migram para a solução, ao mesmo tempo em que alguns íons da solução podem adsorver-se na superfície do sólido até que seja atingido o equilíbrio eletroquímico do sistema. Após o equilíbrio, a superfície sólida apresenta geralmente carga negativa, devido à maior probabilidade dos cátions à hidratação e sua permanência na fase aquosa.

- i) Hidratação da superfície: a superfície hidratada do mineral hidrofílico dá origem aos grupamentos ácidos (H⁺) e básicos (OH⁻), que são dissociados em função do pH da suspensão. A ionização dos grupos ácidos dá origem à superfície com carga negativa. A ionização dos grupos básicos resulta em superfície positiva do mineral.
- ii) Substituição Isomórfica: a substituição isomórfica de um cátion de maior valência por outro de menor valência na estrutura cristalina de alguns minerais induz a necessidade de incorporação de um terceiro cátion para estabelecer a neutralidade elétrica. Em contato com a água, esse terceiro cátion é dissociado deixando a superfície do mineral negativa. A resultante das forças da interação

entre as partículas do mineral determinará sua dispersão ou agregação. Se a resultante das forças tende a afastar uma partícula em relação às outras, tem-se a dispersão. Quando a resultante das forças é a atração entre as partículas sólidas ocorre à agregação, podendo ser ela por aglomeração, coagulação, agregação hidrófoba ou floculação. Os fenômenos de dispersão e agregação ocorrem porque os sólidos, quando apresentam energia livre superficial, necessitam interagir com o meio a fim de abaixar o seu nível energético. Coelho (2009, p.26) lembra que “a formação de agregados estáveis ocorre através das ligações químicas, que podem ser iônicas ou covalentes”. O excesso de carga na superfície de um mineral em meio aquoso dá origem ao conceito da dupla camada elétrica.

A teoria da dupla camada elétrica foi desenvolvida por Helmholtz, em 1879 e aprimorada por Gouy (1910), Chapman (1913) e posteriormente, por Stern (1924). Em síntese, uma das camadas tem excesso de cargas positivas e a outra, excesso de cargas negativas, de forma que a dupla camada elétrica, como um todo, é eletricamente nula (Baltar, 2008). Na figura 10, é apresentado um modelo para a dupla camada elétrica.

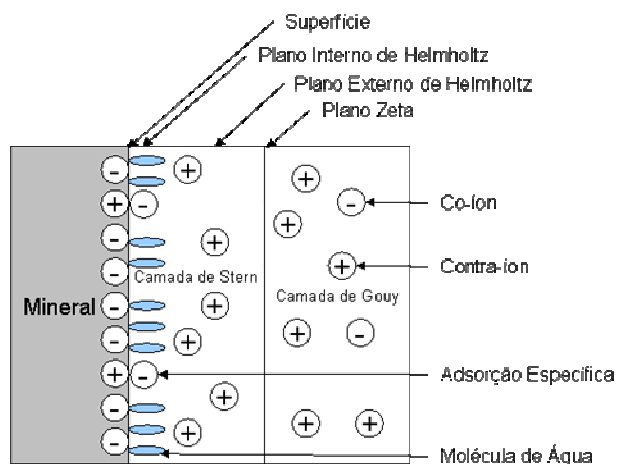


Figura 10: Modelo dupla camada elétrica na superfície de um sólido

Fonte: Adaptado de Baltar, 2008.

Junto à superfície do sólido predominam as moléculas de água e algumas espécies iônicas, que dependendo de sua natureza química, ali se mantêm por meio de uma adsorção específica. O centro de carga dos íons adsorvidos especificamente constitui o Plano Interno de Helmholtz. O centro de carga dos íons solvatados constitui o Plano Externo de

Helmholtz. A Camada de Stern compreende o espaço entre a superfície do sólido e o final da camada onde os contra-íons (íons com sinal contrário da superfície) estão em posições rígidas em relação ao sólido e estão sujeitos a interações específicas e/ou eletrostáticas. A interação eletrostática está sempre presente, ao contrário da específica que possui natureza seletiva (Baltar, 2008).

Na Camada de Gouy, os íons estão em movimentação sob influência da energia térmica, formando uma camada difusa. As forças ocasionadas pela energia térmica e as forças eletrostáticas são da mesma ordem de grandeza. As interações específicas são desprezíveis devido à distância da superfície do sólido (Baltar, 2008).

Baltar (2008) distingue três tipos de íons que podem estar presentes na interface sólido-líquido: íons determinantes de potencial, íons específicos e íons indiferentes.

Íons determinantes de potencial são espécies iônicas que têm a possibilidade de transitar da fase líquida para a fase sólida e vice-versa, dependendo das condições eletroquímicas da suspensão e da espécie mineral em questão (Baltar, 2008 apud Bruyn e Agar, 1962; Fuerstenau, 1982). No caso específico dos óxidos, as espécies H^+ e OH^- são determinadoras de potencial e sua concentração determinará o excesso de cargas na superfície do sólido. Os óxidos tendem a apresentar superfície positiva em meio ácido (altas concentrações de H^+) e negativa em meio alcalino (baixas concentrações de H^+). Daí a importância do pH na formação da carga elétrica dos minerais óxidos. Quando a concentração desses íons é tal que resulte na neutralização da carga elétrica na superfície do mineral, diz-se que a superfície está em seu ponto de carga zero e o potencial é nulo.

Íons específicos são aqueles com afinidade química por algum componente do mineral e, portanto, formam um composto químico na superfície do sólido. Eles também podem adsorver-se por atração eletrostática.

Íons indiferentes são aqueles que estão sob ação de forças eletrostáticas e como tal nunca farão parte na rede cristalina do sólido. Com o intuito de prevalecer a neutralidade elétrica, os íons com carga contrária à da superfície do sólido são atraídos. Esses íons estão sempre solvatados e movimentam-se entre a Camada Externa de Helmholtz e a Camada de Gouy.

Esses íons podem ou não alterar o potencial zeta e o potencial da superfície do mineral. A concentração de íons determinantes de potencial altera o potencial da superfície e o potencial zeta. A concentração de íons indiferentes influencia apenas o valor do potencial zeta. Os íons indiferentes, por atração eletrostática, se aproximam e compactam a dupla

camada elétrica. A presença de íons adsorvidos pode ser notado pela diferença entre o potencial da superfície e o potencial zeta (Baltar, 2008).

O exemplo ilustrado na figura 11 mostra como a adição de soda (NaOH) pode alterar a interface formada pela superfície de uma hematita em água. A molécula de NaOH, em meio aquoso, libera OH^- , íons determinantes de potencial dos óxido, como é o caso da hematita (Fe_2O_3).

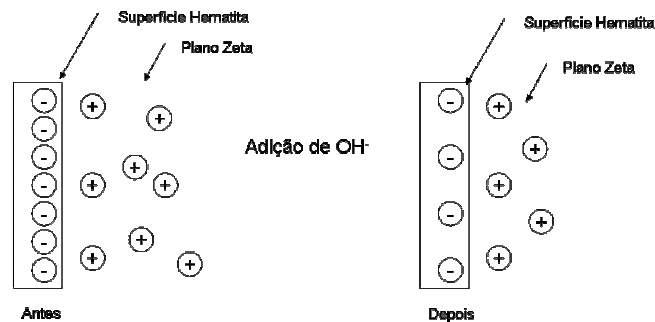


Figura 11: Alteração do potencial eletrocinético da hematita pela adição de NaOH

Fonte: Adaptado de Baltar (2008)

O grupamento OH^- reagirá com os ânions livres no meio aquoso. O excesso de carga positiva no meio será menor e, portanto, menor a força eletrostática atuando sobre a superfície da hematita, acarretando em diminuição do potencial zeta. Assim, menos ânions serão atraídos para a superfície do mineral, diminuindo o potencial da superfície. Por outro lado, caso a quantidade de cátions livres no meio aquoso aumente, maior quantidade de carga negativa estará na superfície do mineral, elevando o potencial superficial e o potencial zeta.

Alguns íons que não são determinantes de potencial podem apenas provocar a compressão da dupla camada elétrica, elevando o potencial zeta, mas não alterando o potencial da superfície do mineral como representado na figura 12.

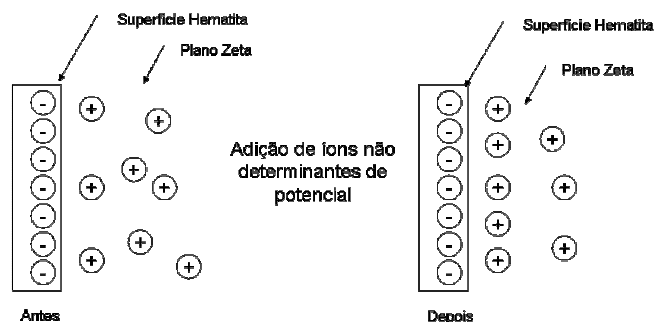


Figura 12: Alteração do potencial zeta da hematita pela adição de íons não determinantes do potencial

Fonte: Adaptado de Baltar (2008)

Pereira (2004 apud Lu et al, 1997) cita que partículas finas suspensas em meio líquido estão sujeitas às forças atrativa de London-van der Waals e a força repulsiva da dupla camada elétrica, energias de interação normalmente consideradas influentes na agregação e dispersão de lamas. As forças de London-van der Waals para duas partículas de mesma natureza, em meio aquoso, são sempre atrativas. Essa força depende da natureza da partícula, do meio e da distância entre as partículas somente. O efeito resultante da interação entre as duplas camadas elétricas de partículas com cargas superficiais idênticas é a repulsão. A intensidade dessa interação depende da distância entre as partículas, do potencial de superfície e, em muitos casos, do valor do pH do meio aquoso. As interações elétricas, também possíveis de acontecer, dependem da natureza e concentração do eletrólito, porém, na existência de carga superficial, independe da natureza da partícula (Lins e Adamian, 2000 apud Lyklema, 1989).

O grau de estabilidade dos finos é determinado pela resultante das forças de atração e repulsão, consolidada na conhecida teoria DLVO, em referência a Derjaguin-Landau e Verwey-Overbeek, duplas de cientistas russos e holandeses, respectivamente, que nos anos 40 desenvolveram independentemente essa teoria. O procedimento consiste essencialmente em calcular a energia livre total de interação em função da distância de separação entre as partículas (Lins e Adamian, 2000).

Segundo Lins e Adamian (2000), supondo-se a aproximação de duas partículas, de acordo com a teoria DLVO, a energia total de interação (V_T) é a soma da energia devida às forças de van der Waals (V_W) e a energia devida às forças elétricas de repulsão (V_E). As expressões para V_W e V_E são definidas para o caso de partículas idênticas e diferentes. A expressão V_W depende a constante de Hamaker, característico do material, e da geometria

do sistema. Quanto maior o valor da constante de Hamaker, maior será a atração entre dois corpos de mesma natureza. A expressão V_E está em função do potencial zeta e da espessura da parte difusa da dupla camada elétrica das partículas. A figura 13 ilustra uma curva típica dessas equações.

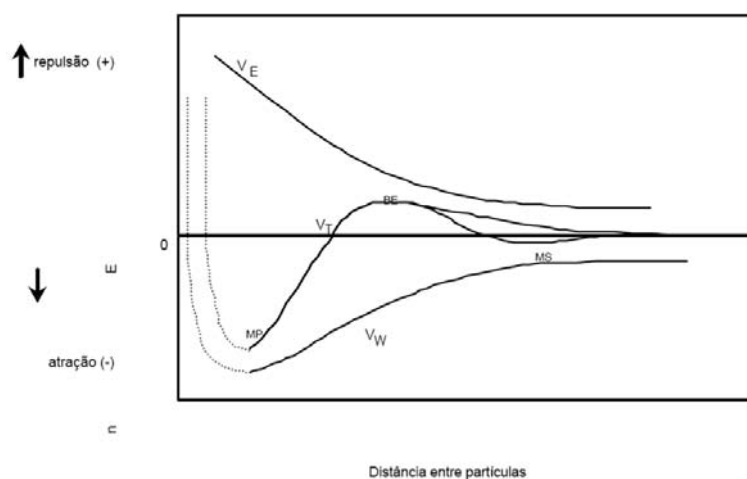


Figura 13: Teoria DLVO clássica: curvas de energia de interação em função da distância de aproximação mútua de duas partículas.

Fonte: Lins e Adamian, p. 07, 2000.

No ponto de mínimo primário (MP), a distância entre as partículas é muito pequena e possibilita que as partículas se agreguem de forma irreversível, normalmente. Pode também ocorrer o mínimo secundário (MS) em soluções eletrolíticas concentradas e/ou com partículas relativamente mais grossas. Nesse ponto ocorre uma agregação (atração) mais fraca, facilmente desfeita por uma agitação moderada, causando a redispersão do sistema (Lins e Adamian, 2000 apud LYKLEMA, 1989).

A teoria DLVO estendida ou teoria X-DLVO, como o próprio nome sugere, é uma extensão da teoria DLVO clássica. Nela, admite-se a possibilidade da existência de forças adicionais referidas comumente como forças estruturais. Essas forças surgem do estruturamento das moléculas do líquido quando estas estão confinadas entre duas superfícies próximas. Em meio aquoso, entre superfícies hidrofílicas, existem forças estruturais repulsiva com intensidade dependendo do grau de hidratação das superfícies. Superfícies hidrofóbicas tenderão a serem atraídas e sua intensidade estará sujeita à

hidrofobicidade da superfície (Lins e Adamian, 2000 apud Israelachvilli e McGuiggan, 1988).

Reagentes reguladores de pH e dispersantes, ambos podem atuar como dispersantes, isso porque a dispersão das partículas finas pode ser obtida através do controle do pH. Os dispersantes têm função específica e atuam no sentido de provocar o aumento da repulsão eletrostática ou a estabilização estérica entre as partículas. São exemplos de dispersantes metafosfato de sódio, silicato de sódio e o carboximetilcelulose. Os dispersantes ganham importância quando a flotação é realizada em meio ácido. Os reguladores de pH podem ser ácidos (sulfúrico ou clorídrico) ou bases (hidróxidos de cálcio, magnésio, sódio e carbonato de sódio, etc.). O hidróxido de sódio (conhecido como soda cáustica) caracteriza-se por propiciar grandes variações de pH em pequenas dosagens na faixa alcalina (Baltar, 2008).

Para Bulatovic (2007), os dispersantes são utilizados para prevenir o fenômeno de *slime coating* quando existem lamas na polpa e agregação das partículas finas ou minerais de ganga durante uma floculação seletiva. Argilo-minerais têm diferentes propriedades de superfície em comparação com partículas maiores em relação ao potencial energético.

Os dispersantes podem ser polímeros orgânicos ou compostos inorgânicos. Amido, dextrina, lignina e éter glicólico são representantes dos dispersantes orgânicos. Silicato de sódio e polifosfato de sódio são exemplos de dispersantes inorgânicos.

Os reagentes inorgânicos atuam principalmente aumentando a carga da dupla camada elétrica, adsorvendo na superfície das partículas através de pontes de hidrogênio ou adsorção química. Krishnan e Iwasaki (1984) mostraram que a adição de silicato de sódio pode neutralizar os efeitos adversos do Ca^{++} em suspensão na dispersão do minério de goethita e quartzo. O potencial zeta diminui consideravelmente com o aumento da concentração de Ca^{++} , devido à adsorção do Ca^{++} na superfície do quartzo, indicando que os íons Ca^{++} atraem os ânions silicato, mas não o suficiente para elevar o potencial zeta ao nível da solução sem Ca^{++} . Aumentando a concentração de silicato de sódio, na ausência de Ca^{++} , o potencial zeta do quartzo e da goethita decrescem, indicando que os íons silicato agem como íons indiferentes desses minerais.

No caso do amido, forças columbianas atuam entre as superfícies do mineral e moléculas desses dispersantes dificultam a adsorção causada por interações não-iônicas. A adsorção das moléculas do polissacarídeo é possibilitada por pontes de hidrogênio. Tais conclusões

foram viabilizadas a partir de investigação sobre a adsorção de amidos em hematita e quartzo (Bulatovic, 2007 apud Balajee e Iwasaki, 1969).

Bulatovic (2007, apud Jewet, 1956; Plaskin, 1965) menciona a existência de forças eletrostáticas na adsorção de argilas na superfície dos minerais devido à atração das cargas opostas. Os minerais com recobrimento de argilas são menos propensos a formar um sistema disperso, porém dependerá do potencial da superfície das lamelas em diferentes ambientes.

Bulatovic (2007, apud Bankoff, 1943) propõe três diferentes formas para dispersão das lamelas:

- i) remover as cargas positivas por transferência de prótons ou adição de NaOH;
- ii) neutralização, carregando positivamente, com adsorção de ânions de Cl^- ;
- iii) adicionar argilo-minerais com cargas opostas.

A ação de dispersão de polímeros não está associada a adsorção do polímero em partículas maiores no caso de quartzo e óxidos. Na realidade, o polímero proporciona as condições para que as argilas sejam mantidas dispersas. Na prática, os amidos modificados são bons dispersantes de lamelas de silicato, mas não são eficazes para a dispersão de argilas caulinita-ilita.

As lamelas liberadas dos poros dos minerais na etapa de atrição tenderam a retornar para a superfície dessas partículas ou formarem agregados entre si após adquirirem carga ao reagirem com íons de oxigênio da água. O dispersante atua modificando a carga seletivamente a fim de evitar a atração entre partículas. Industrialmente, é comum a utilização de soda caustica, como é conhecida popularmente o hidróxido de sódio (NaOH). Por se tratar de uma base, o hidróxido de sódio modifica o pH da polpa. Isso implica em menor presença de íons de oxigênio livres e, portanto, menor potencial elétrico na superfície de alguns minerais, que por sua vez, praticamente deixarão de atrair partículas de carga oposta, no caso as lamelas.

METODOLOGIA E MATERIAIS

Como o objetivo de investigar a possibilidade de aumento da recuperação metalúrgica na flotação com a inclusão de uma etapa de atrição do minério que alimenta a Instalação de Tratamento de Minério de Vargem Grande foram realizados testes em escala de bancada no laboratório de processo dessa unidade operacional.

5.1. Coleta da Amostra

A amostra para os testes foi coletada no fluxo de underflow dos hidrociclones industriais que antecede o espessamento e o circuito de flotação na ITM VGR, como apresentado na figura 14.

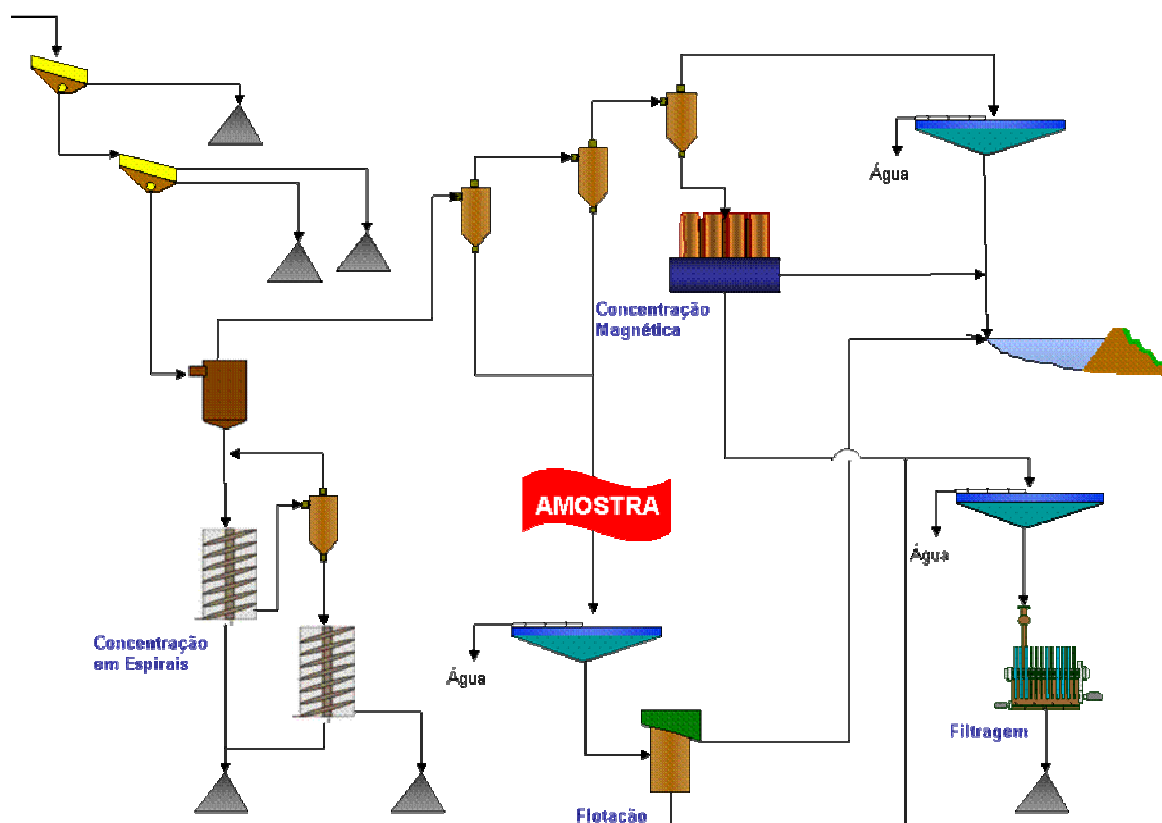


Figura 14: Ponto de coleta da amostra

Fonte: Própria autora, 2009.

O fluxo amostrado tem vazão média de 680 t/h de polpa com 72% de sólidos em peso. A amostra foi coletada no período de um turno (6 horas), de forma que fosse representativa e possibilitasse a realização dos testes em escala de bancada após quarteada.

Durante a amostragem, a ITM VGR era alimentada pelo minério pré-britado da Mina Capitão do Mato e da Mina de Tamanduá e 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.

5.2. Testes Exploratórios

A amostra em polpa foi dividida em quatro partes iguais após homogeneização.

Foram realizados quatro testes em escala de bancada:

Teste 1: a amostra foi submetida diretamente à um teste de flotação em pH natural.

Teste 2: a amostra foi agitada por 3 minutos, deslamada e submetida ao teste de flotação em pH natural.

Teste 3: a amostra em pH 9,8, foi agitada por 3 minutos, deslamada e submetida ao teste de flotação.

Teste 4: a amostra foi agitada por 10 minutos em pH 9,8, deslamada e submetida ao teste de flotação.

5.3. Ensaio de Flotação

Os ensaios de flotação foram realizados em escala de bancada em uma célula Engendrar CFB-1000, em cuba com uma capacidade volumétrica de 1.000 cm³, com rotação de 1.500 rpm. Foram adotadas como padrão para todos os ensaios de flotação as seguintes concentrações de reagentes:

coletor: amina, dosagem de 45g/t de alimentação;

depressor: amido, dosagem 720 g/t de alimentação.

O teste de flotação, comum a todas as amostras, foi realizado para avaliar os resultados de recuperação metalúrgica, segundo descrito a seguir.

- 1- Medição do percentual de sólidos na polpa.
- 2- Correção da % sólidos da polpa para 50%.
- 3 - Transferência da polpa para a cuba de flotação.
- 4- Dosagem de 720 g/t de amido, condicionando-o por 3 minutos.
- 5- Medição do pH da polpa.
- 6 - Adição de 45g/t de amina, condicionando por 1 minuto.
- 7- Coleta da espuma até a exaustão, completando o volume da cuba com água em pH 10,50 sempre que necessário.
- 8 - Secagem, pesagem e encaminhamento para análise química o rejeito e o concentrado final.

5.4. Ensaio de Deslamagem

A deslamagem foi realizada antes da flotação nos testes 2, 3 e 4.

Utilizou-se a cuba de flotação e o agitador da célula de flotação a 1.500 rpm. O ensaio seguiu o procedimento abaixo:

- 1- Agitação da polpa por 3 minutos, deixando-a em repouso por 5 minutos.
- 2- Sifonamento do sobrenadante, transferindo-o para o recipiente. Trata-se da lama do teste. O sifão foi mantido no nível pré-estabelecido indicado na cuba de flotação.
- 3 – Reserva do afundado para o ensaio de flotação em bancada.
- 4- Retirada e encaminhamento de uma alíquota do afundado para análise química.

No teste 3, o pH da polpa foi ajustado para 9,8 com adição de NaOH na polpa contida no béquer.

5.5. Ensaio de Atrição

A atrição em escala de bancada foi simulada utilizando a cuba de flotação e o agitador da célula de flotação a 1.500 rpm. O procedimento adotado no teste 4 foi o seguinte:

- 1 - pH da polpa foi ajustado para 9,8 com adição de NaOH.
- 2 – Agitação da polpa por 10 minutos, deixando-a em repouso por 5 minutos
- 3 - Sifonamento do sobrenadante, transferindo-o para o recipiente.
- 4 - Reserva do afundado para o ensaio de flotação em bancada.
- 5 - Retirada e encaminhamento de uma alíquota do afundado e flutuado para análise química.

A análise química dos produtos foram realizadas pelo Laboratório Químico da Vale através do método de difração de raios-X.

5.6. Desempenho da Flotação

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. (Valadão e Araújo, 2007)

O resultado das análises químicas foi utilizado para cálculo da recuperação metalúrgica e índice de seletividade através das fórmulas a seguir, dos quatro ensaios de flotação, em diferentes condições.

$$R = (\text{Alim} - \text{Rej}) / (\text{Conc} - \text{Rej}) \times (\text{Conc} / \text{Alim}) \times 100$$

onde,

R = recuperação metalúrgica;

Alim = teor do elemento útil na alimentação;

Conc = teor do elemento útil no concentrado;

Rej = teor do elemento útil no rejeito.

$$IS = ((R_1 \times T_2) / (R_2 \times T_1))^{1/2}$$

onde,

IS = índice de seletividade

R₁ = recuperação da espécie 1 no concentrado

R₂ = recuperação da espécie 2 no concentrado

T₁ = recuperação da espécie 1 no rejeito

T₂ = recuperação da espécie 2 no rejeito

Os indicadores de desempenho dos quatro testes foram comparados para mensurar a efetividade da atrição na remoção das lamelas e diminuição do teor de sílica no concentrado.

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os resultados dos testes de bancada de atrição, deslamagem e flotação do underflow dos hidrociclones industriais da ITM VGR.

6.1. Amostra de Alimentação dos Ensaio

A amostra de underflow dos hidrociclones apresentava os teores apresentados na tabela 1.

Tabela 3: Teores na amostra

Identificação	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	S	PPC	Fechamento Químico
VGR-08- CS 1929 ALIM.FLOT 2 TURNO 04/12/08	61,84	9,20	0,62	0,025	0,053	0,015	0,002	0,070	0,001	0,92	99,38

Fonte: Própria autora

A amostra coletada continha 9,20% de sílica e 61,84% de ferro.

6.2. Resultado dos testes

Os resultados dos quatro testes realizados são apresentados a seguir.

Teste 1

A tabela 2 apresenta os resultados do teste 1, amostra flotada em pH natural sem deslamagem em bancada.

Tabela 4: Resultado do teste 1

Identificação	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	S	PPC	Fechamento Químico
VGR-08- CS 1928 CONC.FLOT TESTE 01	67,81	0,99	0,60	0,035	0,058	0,015	0,010	0,083	0,001	1,00	99,82
VGR-08- CS 1927 REJ.FLOT TESTE 01	51,98	24,39	0,81	0,011	0,035	0,015	0,011	0,049	0,001	0,80	100,48

Fonte: Própria autora

O teor de ferro no concentrado da flotação nessas condições foi de 67,81%, acarretando em uma recuperação metalúrgica de 68,3% e índice de seletividade de 5,4. O teor de sílica no concentrado foi de 0,99%.

Teste 2

A tabela 3 apresenta os resultados do teste 2, amostra deslamada em bancada e flotada em pH natural.

Tabela 5: Resultado do teste 2

Identificação	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	S	PPC	Fechamento Químico
VGR-08- CS 1922 CONC.FLOT. TESTE 02	68,17	1,44	0,53	0,030	0,051	0,016	0,010	0,076	0,001	0,97	100,66
VGR-08- CS 1921 REJ.FLOT. TESTE 02	48,73	28,74	1,18	0,017	0,044	0,015	0,017	0,057	0,001	0,91	100,70

Fonte: Própria autora

O teor de ferro no concentrado da flotação nessas condições foi de 68,17%, acarretando em uma recuperação metalúrgica de 74,3% e índice de seletividade de 4,8. O teor de sílica no concentrado foi de 1,44%.

Teste 3

A tabela 4 apresenta os resultados do teste 3, amostra deslamada em bancada em pH 9,8 e flotada.

Tabela 6: Resultado do teste 3

Identificação	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	S	PPC	Fechamento Químico
VGR-08- CS 1924 CONC.FLOT. TESTE 03	67,28	0,77	0,44	0,028	0,040	0,015	0,010	0,079	0,001	0,97	98,61
VGR-08- CS 1923 REJ.FLOT. TESTE 03	51,39	26,1	0,63	0,006	0,015	0,016	0,011	0,048	0,001	0,52	100,85

Fonte: Própria autora

O teor de ferro no concentrado da flotação nessas condições foi de 68,28%, acarretando em uma recuperação metalúrgica de 71,5% e índice de seletividade de 6,5. O teor de sílica no concentrado foi de 0,77%.

Teste 4

A tabela 5 apresenta os resultados do teste 4, amostra deslamada em bancada em pH 9,8, atritada e flotada.

Tabela 7: Resultado do teste 4

Identificação	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	CaO	MgO	TiO ₂	S	PPC	Fechamento Químico
VGR-08- CS 1926 CONC.FLOT TESTE 04	68,50	0,80	0,31	0,021	0,031	0,016	0,010	0,070	0,001	0,74	99,99
VGR-08- CS 1925 REJ.FLOT. TESTE 04	44,60	35,9	1,13	0,018	0,036	0,016	0,018	0,064	0,025	0,87	101,89

Fonte: Própria autora

O teor de ferro no concentrado da flotação nessas condições foi de 68,50%, acarretando em uma recuperação metalúrgica de 79,9% e índice de seletividade de 7,5. O teor de sílica no concentrado foi de 0,80%.

A tabela 6 resume os resultados encontrados nos testes.

Tabela 8: Resumo dos testes exploratórios

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

Fonte: Própria autora

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 cumprem o papel 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 lambras da superfície dos minerais, prejudicial ao bom desempenho da flotação.

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 (2002) 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 (2003), avaliando os resultados da atrição do minério de ferro, atesta a impossibilidade de quantificar a "fase terrosa" (lambras) 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.

5 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 lamas, nessa circunstancia, preenche as cavidades e/ou recobre o mineral.

A operação de deslamagem em hidrociclones, algumas vezes, é suficiente para remoção das lamas para garantir condições ideais para a flotação. Em outros casos, é necessária a atrição, dispersão e deslamagem do minério antes da flotação. 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, se têm aplicado, industrialmente, 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.

A remoção de lamas aderidas à partículas do mineral está condicionado à dispersão. Em meio aquoso, partículas coloidais (lamas) tendem a formar agregados entre si ou se depositarem na superfície de partículas maiores, fenômeno conhecido como *slime coating*. A interação dessas partículas com íons de oxigênio da água faz com que elas adquiram carga elétrica superficial positiva ou negativa. Industrialmente, é comum a utilização da soda cáustica (NaOH) com o objetivo de provocar o aumento da repulsão eletrostática ou a estabilização estérica entre as partículas. Sendo assim, a atrição tem como principal função remover material terroso dos poros de grãos de minerais e a dispersão, impedir que esse material terroso, coloidais, seja atraído para a superfície dos grãos do mineral.

O ROM das Minas de Capitão do Mato e Tamanduá homogeneizado em pilhas chevron é concentrado por flotação na Instalação de Tratamento de Minério de Vargem Grande.

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% da recuperação metalúrgica e na 40% do 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 lamas prejudiciais à flotação reversa do minério de ferro proveniente das Minas de Capitão do Mato e Tamanduá. A atrição seguida da deslamagem em meio disperso mostrou-se um método adequado para remoção das lamas, que podem estar presentes nos poros e/ou encobrendo os grãos dos minerais.

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

6 RECOMENDAÇÕES DE PESQUISAS FUTURAS

A ITM VGR é alimentada com a mistura homogeneizada do minério das Minas de Capitão do Mato e Tamanduá em proporções não muito rígidas. Em experimentos futuros seria adequado conhecer a proporção de minério de cada uma das minas.

Neste estudo, utilizou-se referências bibliográficas a respeito da mineralogia do minério de ferro das Minas de Capitão do Mato e Tamanduá. Por se tratar de informações não muito recentes, seria interessante conhecer a mineralogia dos minerais remanescentes nas cavas atualmente. Mais especificamente, seria interessante avaliar a quantidade de poros nos grãos dos minerais e a presença de material terroso.

Os testes foram realizados em bancada utilizando uma célula de flotação. É aconselhado que, em testes futuros, utilize-se célula de atrição semi-piloto, a exemplo do que foi utilizado para os testes com o pré-concentrado de zircão realizado por Sabedot e Sampaio (2002).

A avaliação dos resultados neste estudo foi feita de forma indireta pelos resultados da flotação. Complementar a esse resultado, seria interessantes avaliar por microscopia óptica as condições dos poros (que por ventura tenham) dos grãos dos minerais antes e depois da atrição. Depois da deslamagem em meio disperso seria também aconselhável avaliar a eficácia da remoção do recobrimento por lamas dos grãos utilizando lupa binocular.

No caso da implantação de células de atrição industrialmente, torna-se primordial avaliar a inserção de uma etapa de adensamento da polpa antes da atrição para ajuste do percentual de sólidos e o estudo do modelo de impelidor mais adequado e com menor consumo energético.

7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ARAÚJO, R. V. de; SOBRAL, L. G. S.; SANTOS, R. L. C. Produção de fosfato no Brasil: Complexo Mineração de Tapira / Fosfertil. **XIX ENTMME**. Permutbuco: CETEM, 2002. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/publicacao/CTs/CT2002-050-00.pdf>. Acessado em: 14/10/09.

BALTAR, C. A. M. **Flotação no Tratamento de Minérios**. Recife: Departamento de Engenharia de Minas/ UFPE, 2008. 211 p.

BALTAR, C. A. M. **Flotação no Tratamento de Minérios**. Recife: Departamento de Engenharia de Minas/ UFPE, 2008.

BARROS, L. A. F. de. **Relatório de Visita: Fosfertil - Fertilizantes Fosfatados S/A. Mina de Tapira**. Araxá, 1996.

BOTELHO, L. C. S. **Sistemas Mecanicamente Agitados**. Campinas: Engendrar, [ca. 2009]. Apostila.

BULATOVIC, Srdjan 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).

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>. Acessado em: 13 out. 2009.

COELHO, L. C. **Separação seletiva entre a willemita e seus minerais de ganga**. 2009. 44 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2009. (Inédito)

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,

DARMA. Disponível em: <http://www.aeromecanicadarma.com.br/mineracao.htm>. Acessado em 28/09/09.

ENGENDRAR. Disponível em: http://www.engendrar.com.br/aplicacao.asp?paramCat=bene_¶mID=51. Acessado em 17/09/2009.

Krishnan, S. V.; Iwasaki, I. Pulp dispersion in selective desliming of iron ores. **Elsevier International Journal of Mineral Processing**, 12, pp. 1—13. Elsevier Science Publishers B.V.: Amsterdam, 1984

LINS, F. A. F.; ADAMIAN, Rupen. **Minerais coloidais, teoria DLVO estendida e forças estruturais**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2000.

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>. Acessado em 24/10/09.

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.

METSO Minerals. **Manual de Britagem**. 6ª ed. Publicação Técnica da Metso Mineral, 2005.

Mineralogical Studies: MBR Ores, 2001. Apresentação em Power Point.

MOREIRA, Zu. Fabricante nacional procura mais aço no mercado externo. In: **O tempo**. Belo Horizonte. 29 de abril de 2009.

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.

PEREIRA, C. A. **Estudo da dispersão e concentração de minério calamínico**. 2004. 119 p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Belo Horizonte, 2004.

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.

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)

QUEIROZ, Leonardo de Almeida ; PADOVEZI, Antonio Daher ; FERREIRA, Antonio Delfonso ; PERES, A. E. C. . The effect of mineralogy on desliming and flotation of itabirite iron ores. In: **Iron Ore 2005**, 2005, Fremantle. Iron Ore 2005 Proceedings, 2005. v. 1. p. 385-388.

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. Acessado em 20/10/08.

ROSIÈRE, C. A.; RENGER, F. E.; PIUZANA, D.; SPIER, C. A. Pico de Itabira, MG - Marco estrutural, histórico e geográfico do Quadrilátero Ferrífero. In: WINGER, M; SCHOBENHAUS, C.; BERBERT-BORN, M.; QUEIROZ, E. T.; CAMPOS, D. A.; 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>. Acessado em 05/04/09.

SABEDOT, Sydney; SAMPAIO, Carlos Hoffmann. Ensaio de atrição em pré-concentrado de zircão: um processo semipiloto. **Revista da Escola de Minas**. Vol. 55. nº 2. Ouro Preto. Abril/ 2002.

SÁNCHEZ, L. E. Mineração e Meio Ambiente. 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. 191 - 208 p.

SANTOS, Pécio de Souza. **Tecnologia de argilas, aplicada às argilas brasileiras**. São Paulo, Edgard Blücher, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1975.

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.

SILVA, R. V. G.; ARAÚJO, A. C.; PERES, A. E. C. The effect of alumina on the flotation of some iron ores. In: **Southern Hemisphere Meeting on Mineral Technology**. Rio de Janeiro: CETEM/ MCT, 2001. pp. 199-203.

SOUZA, E. S. de. **Rota de processo para aproveitamento de rochas itabiríticas estéreis da Mina de Conceição**. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2005. 104 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas).

VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. **Introdução ao Tratamento de Minérios**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

VILELA, R. A. ; MELO, R. J. de; 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.