



Octubre 2017 - ISSN: 1988-7833

ESTUDO DE CASO: TECNOLOGIAS E PROCESSOS UTILIZADOS NO TRATAMENTO DE MINÉRIOS DE FERRO DE BAIXO TEOR

Júnia Soares Alexandrino¹

Universidade Estadual de Minas Gerais UEMG –
Minas Gerais, Brasil

Adriano Jose de Barros²

Universidade Estadual de Minas Gerais UEMG –
Minas Gerais, Brasil

Cibelle Cristina Martins Silva³

Universidade Estadual de Minas Gerais UEMG –
Minas Gerais, Brasil

Cínthia Alexandre da Silva Dornelas⁴

Universidade Estadual de Minas Gerais UEMG –
Minas Gerais, Brasil¹

Para citar este artículo puede utilizar el siguiente formato:

Júnia Soares Alexandrino, Adriano Jose de Barros, Cibelle Cristina Martins Silva y Cínthia Alexandre da Silva Dornelas (2017): “Estudo de caso: tecnologias e processos utilizados no tratamento de minérios de ferro de baixo teor”, Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales, (octubre-diciembre 2017). En línea:

<http://www.eumed.net/rev/cccs/2017/04/tratamento-minerios-ferro.html>

RESUMO

Esse trabalho descreve a situação atual e as tendências relacionadas ao tratamento de minérios de ferro de baixo teor na indústria mineral, utilizando a pesquisa bibliográfica para apontar e discutir os principais equipamentos e processos empregados na recuperação destes minérios. Seu objetivo principal é relatar sobre a evolução nos processos de beneficiamento de minérios devido à escassez de jazidas com alto teor de ferro, levantando quais as principais soluções disponíveis no mercado para se processar minérios pobres, tais como os itabiritos compactos, associadas aos conceitos de geologia dos depósitos, mercado de bens minerais, e beneficiamento mineral. Propôs-se apresentar quais os principais empreendimentos mineiros que processam atualmente minérios de ferro com baixo teor, as rotas de beneficiamento mais utilizadas para essa finalidade, bem como os principais desafios encontrados pelo setor para adequar os processos à realidade das jazidas minerais.

Palavras-chave: Minério de ferro - Baixo teor - Beneficiamento mineral - Tendências tecnológicas.

ABSTRACT

This paper describes the current status and trends related to the processing of iron ore of low content in the mineral industry, using literature to point and discuss the main equipment and processes used in the recovery of these minerals. Its main purpose was to report on progress in the processing of ores due to the scarcity of deposits with high iron content, up which the main solutions available on the market to process poor ores, such as compact itabirites, associated with geological concepts deposits, market for mineral goods, and mineral beneficiation. He proposed to present what the major mining projects currently processing iron ore with low content processing routes most used for this purpose as

¹Doutorado em Tecnologia Mineral pela Universidade Federal de Minas Gerais. Professor na UEMG. E-mail: juniaalexandrino@yahoo.com.br

²Doutorando Geografia e Tratamento de Informação Espacial (PUC Minas/BH) - Professor da UEMG Unidade João Monlevade – E-mail: adrianojosedebarras@gmail.com

³Engenharia de Minas. Universidade do Estado de Minas Gerais UEMG E-mail: cibellecmsilva@gmail.com

⁴Engenharia de Minas, Universidade do Estado de Minas Gerais UEMG. E-mail: cinthiaalex02@gmail.com

well as the main challenges faced by the sector to adapt the processes to the reality of mineral deposits.

Keywords: Iron ore - Low content - Mineral Beneficiation - Technology trends.

1 INTRODUÇÃO

As tecnologias e processos utilizados no tratamento de minérios de ferro de baixo teor estão com a demanda cada vez maior, devido à escassez de minérios com alto teor de ferro nas principais jazidas do Brasil. Diante deste cenário, é crescente a necessidade das empresas mineradoras alocar investimentos para adequar suas instalações ou criar projetos para os processos de concentração de minérios pobres.

Segundo Vieira, M. (2010) a primeira fase da mineração ocorreu entre os anos de 1940 até o final da década de 1960, do qual se explorou a hematita, minério rico, com teores superiores a 60% de ferro. A segunda onda, após a década de 1970 ocorreu com a extração dos itabiritos friáveis com baixos teores de ferro variando entre 50 a 60%. Atualmente, vencido o desafio tecnológico, vivenciou-se a terceira onda da mineração com o itabirito compacto, cujo teor encontra-se abaixo de 42% de ferro.

Exemplo deste cenário está ocorrendo na cidade de Itabira, no estado de Minas Gerais, considerada berço da mineração de ferro no Brasil. A Vale mineradora de grande porte, presente no local desde 1942, após processar minérios de alto e médio teor, está investindo em tecnologias que permitem o aproveitamento de minério mais pobres - o itabirito compacto com teor de Fe abaixo de 40%. Com a readequação das usinas de beneficiamento, a mineradora pretende reaproveitar o minério que antes seria tratado como rejeito e agora será revertido em produto (VALE, 2016).

Para Carvalho, P. et al. (2014) uma das tendências e desafios da indústria da mineração de ferro são os custos operacionais que tenderão a aumentar, influenciados pela queda na qualidade das reservas minerais, conseqüentemente enfrentarão uma competição por outros recursos, tais como mão de obra, equipamentos, tecnologias, bem como adquiri-los.

Este estudo teve como objetivo apontar e discutir sobre as atuais tecnologias e processos de beneficiamento, empregados na recuperação de minérios de ferro de baixo teor. Levantar as principais soluções e tendências tecnológicas para o processamento e recuperação deste tipo de minério.

2 METODOLOGIA

O trabalho desenvolvido adotou os princípios do estudo exploratório, de natureza básica e abordagem quantitativa por meio de uma pesquisa bibliográfica, formulada a partir de material já elaborado, constituído de livros, monografias, dissertações e artigos científicos (GIL, 2008). Seguindo a proposta de Gil (2008) as etapas abaixo foram desenvolvidas:

Levantamento das fontes de pesquisa, coleta de dados e registro das informações extraídas das fontes em instrumento específico. Foram consideradas como critério de inclusão as bibliografias que abordassem os temas geologia, mineralogia e tratamento de minérios de ferro, com foco nas principais tecnologias adotadas na atualidade e a evolução dos processos de beneficiamento para minérios de ferro pobres. De acordo com Carvalho, B., (2012) existem desafios a serem superados pela indústria da mineração como a competitividade no mercado, por meio da redução de custos, melhoria de desempenho e aumento de vida útil das reservas. Somam-se a esta condição, atender a indústria siderúrgica, principais clientes do setor, que estão cada vez mais exigentes quanto às especificações físicas e químicas das matérias primas.

3 TRATAMENTO DE MINÉRIOS DE FERRO

Tratamento de minério consiste em um conjunto de operações para modificar a granulometria e a concentração dos minerais, sem modificar suas propriedades químicas ou físicas (VALADÃO; ARAUJO, 2007).

O tipo de tratamento aplicado no minério depende principalmente, dos teores da jazida e da qualidade desejada do produto final (TAVARES, 2009). Definido esses parâmetros, as operações de beneficiamento são elaboradas sequencialmente de modo a aumentar a concentração dos minerais úteis contido nos minérios (VALADÃO; ARAUJO, 2007).

Ainda de acordo com Valadão e Araujo (2007), o tratamento de minério pode ser dividido nas seguintes etapas: cominuição, separação por tamanho, concentração, separação sólido/líquido entre outras operações auxiliares.

Para Luz, Sampaio e França (2010) na prática não é possível adquirir uma concentração completa das diferentes espécies minerais. Sabe-se que, quanto maior a exigência de teor nos concentrados, menor será o rendimento em massa, fato que reflete na viabilidade econômica do tratamento. Comumente, conseguir a elevação dos teores com recuperações melhores provoca um aumento de custo na aquisição de equipamentos e processos mais eficientes. Logo, esses fatores devem ser estudados detalhadamente para a obtenção de maiores lucros e sucesso operacional.

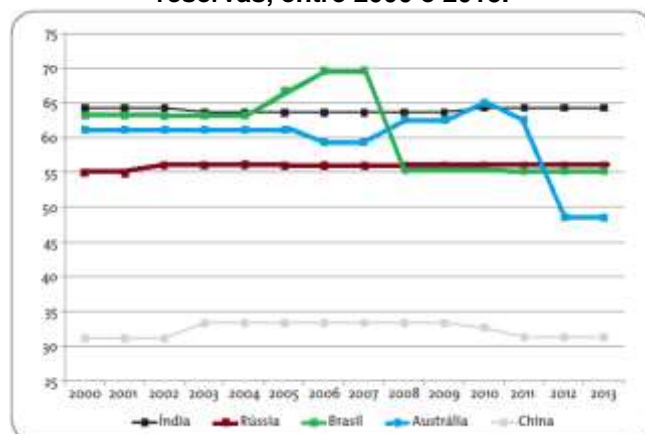
É importante salientar que os custos do tratamento de minérios não devem ser maiores do que a agregação de valor ao produto obtido, salvo em casos especiais, como por exemplo, casos de guerra (LUZ, SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Segundo Gomes (2009), devido à predominância de depósitos de itabiritos e a escassez de reservas de altos teores no quadrilátero ferrífero, há uma tendência no aumento da participação de minérios com teores de ferro mais baixo na alimentação das usinas, com etapas cada vez mais complexas.

3.1 Histórico e evolução dos métodos de tratamento de minérios de ferro mais utilizados no Brasil

Inicialmente a mineração aproveitava apenas os minérios naturalmente ricos, porém a escassez das reservas ao longo dos anos levou à necessidade de recuperação dos itabiritos, rochas mais pobres em Fe, com maior presença de sílica (FERREIRA; SILVA; MARQUES, 2015). Como pode ser visto na figura 1, Brasil e Austrália os maiores produtores mundiais, obtiveram uma queda significativa no valor médio dos teores de ferro em suas reservas nos últimos anos (CARVALHO, P. et al., 2014).

Figura 1 - Evolução dos teores médios de ferro (%) dos cinco países com as maiores reservas, entre 2000 e 2013.



Fonte: USGS, 2013 apud CARVALHO, P. et al., (2014).

Até o final dos anos 60, somente os minérios hematíticos com um teor de ferro maior que 60% de Fe eram produzidos no país. Este minério rico permitia um tratamento simples baseado em cominuição (britagem) e classificação (peneiramento). Os produtos gerados eram principalmente granulados como *lump*, e raramente algum *sínter feed* (ECM, 2007).

Nos anos 70 e 80 iniciou-se o aproveitamento dos itabiritos. Minérios com teores de ferro entre 50 e 60% começaram a ser aproveitados por meio de processos de concentração. Em 1972 a mineradora VALE S/A desenvolveu e instalou a primeira planta de concentração magnética de alta intensidade na mina do Cauê, produzindo *sínter feed*. Na sequência, em 1978 a Samarco mineração despontou com o processo de concentração por flotação, produzindo *pellet feed*. Posteriormente, outros projetos também foram implantados como Carajás e mineração Casa de Pedra ampliando a participação de *sínter feed* e *pellet feed* na produção do país (ECM, 2007).

Na década de 90 houve o efetivo aproveitamento de minérios hematíticos e de itabiritos friáveis e semi-friáveis. Porém, este foi um período de estagnação na implantação de novos projetos (ECM, 2007).

O Brasil possui extensas reservas de minério de ferro itabiríticos, caracterizado pelo baixo teor de ferro. Dentre todos litotipos, os itabiritos friáveis e com mais de 45% de ferro são explorados economicamente, sendo os depósitos itabiríticos compactos com baixo teor de ferro (< 40%) e liberação fina, considerados de baixa atratividade (LOTTERMANN, 2012).

A partir de 2000, foram realizados estudos e testes direcionados a implantação de projetos para o aproveitamento de itabiritos friáveis com teor de Fe no ROM abaixo de 45%. Após 2005, os estudos

já buscavam o aproveitamento de minérios com teor de Fe inferior a 40%, característico dos itabiritos compactos (ECM, 2007). A figura 2 mostra a evolução do tratamento de minério de ferro no Brasil.

Figura 2 - Evolução do Tratamento de Minério de Ferro no Brasil



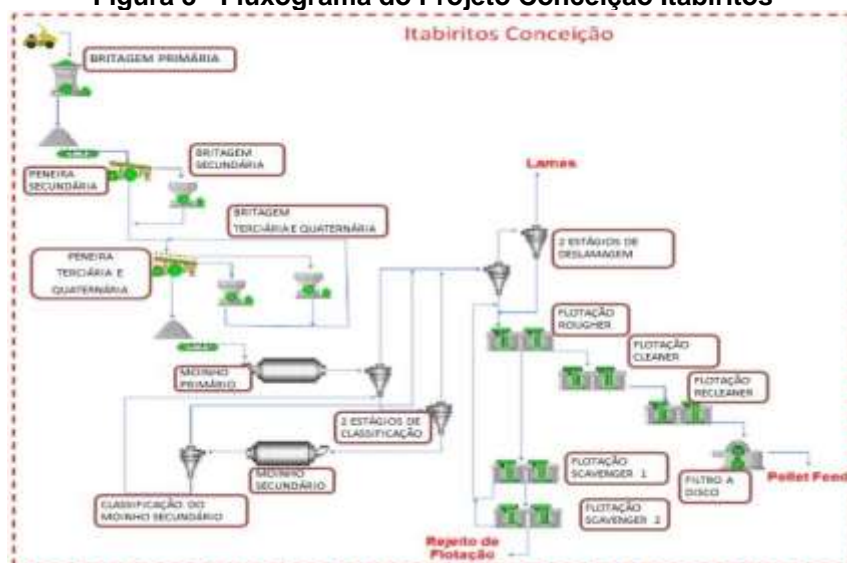
Fonte: Pinto (2016).

Esse cenário se aplica a várias minas do Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais, que atualmente operam com processamento de hematitas ou itabiritos friáveis e carecem, no médio prazo, criar rotas e tecnologias para beneficiamento dos itabiritos compactos, que não são aproveitados. Dessa forma, o desenvolvimento de rotas técnica e economicamente viáveis para concentração dos itabiritos compactos, com geração de produtos dentro das especificações do mercado, é fundamental para garantir a sustentabilidade das operações de minério de ferro na região do Quadrilátero Ferrífero (PINTO, 2016).

A rota para beneficiamento dos itabiritos compactos compreende, basicamente, cominuição de toda a alimentação da usina, seguida pelas etapas de deslamagem e flotação, com a produção somente de *Pellet Feed*. Muitas vezes, em função do requerimento energético e da malha de liberação do minério, são aplicadas até três etapas de moagem combinadas com até duas etapas de flotação. Um exemplo de beneficiamento de itabiritos compactos é o projeto Itabiritos Conceição, localizado em Itabira, MG, de propriedade da Vale, que iniciou suas operações em 2013 (PINTO, 2016).

A figura 3 mostra o fluxograma de processo do projeto Itabiritos Conceição.

Figura 3 - Fluxograma do Projeto Conceição Itabiritos



Fonte: Pinto (2016).

4 TENDÊNCIAS TECNOLÓGICAS E DE PROCESSOS

As usinas de tratamento de minério de ferro são projetadas de acordo com as características particulares do minério alimentado ROM (*Run Of Mine*) e do produto a ser ofertado, levando-se em consideração as exigências do mercado. Sabe-se, que os custos para processar minério de ferro têm aumentado em função das extensivas etapas de cominuição e concentração mineral, perante a carência de minérios de alto teor de ferro ($> 60\%$) (VARELA, 2013).

Tipicamente, o rendimento mássico das plantas de concentração de minérios itabiríticos é em torno de 50%. Para o seu processamento, caracterizado, em sua maioria, ao baixo grau de liberação entre os minerais valiosos e os contaminantes nas frações grossas, observa-se a aplicação de sucessivos estágios de britadores e outras etapas complementares de redução de tamanho de partícula, com a inclusão de circuitos de moagem, que frequentemente opera em via úmida, diferente dos britadores, que em sua maioria operam com o minério em sua umidade própria (VARELA, 2013).

As tecnologias mais utilizadas para o aproveitamento de partículas grossas são a separação gravimétrica (jigagem e espirais) e a separação magnética (WHC e WDRE). Quando empregado corretamente, a recuperação de partículas grossas tem como principal benefício o baixo investimento em equipamentos de cominuição e, por consequência, uma economia significativa de energia. Entretanto, a flotação reversa é a tecnologia mais empregada para concentrar as partículas finas e ultrafinas de minério de ferro ($-0,150$ mm), gerando um produto com baixo teores de SiO_2 ($< 2\%$) e alto teor de ferro ($> 65\%$) (VARELA, 2013).

Nos últimos dez anos alguns projetos para o tratamento de minérios de ferro pobres foram desenvolvidos e implantados no Brasil como são listados na figura 4. Na figura 5 são indicados alguns impactos das características tecnológicas desse tipo de minério nos resultados econômicos dos projetos em geral (ECM, 2007).

Figura 4 - Principais projetos desenvolvidos para minério de ferro pobre nos últimos anos

Projeto Quarta Pelotização (SAMARCO) 9,5 mtpa (pellet feed)	"Altas" capacidades de produção: 8 a 40 mtpa
Projeto Terceira Pelotização (SAMARCO) 8,0 mtpa (pellet feed)	
Projeto Usiminas Mineração (USIMINAS) 19 mtpa (sinter feed e pellet feed)	Produto predominante: pellet feed.
Projeto Expansão de Casa de Pedra (CSN) 40 mtpa (granulado, sinter feed e pellet feed)	Teores de Ferro da alimentação $< 50\%$ (em alguns casos $< 40\%$)
Projeto Itabiritos Compactos de Conceição (VALE) 12 mtpa (pellet feed)	
Projeto Minas-Rio (ANGLO-FERROUS) 24,5 mtpa (pellet feed)	Processos complexos, envolvendo etapas de moagem e concentração.
Projeto 130 Milhões (VALE) 30 mtpa (sinter feed)	
Projeto Brucutu (VALE) 24 mtpa (sinter feed e pellet feed)	Investimentos mais elevados: até US\$ 85/t de produto.
Projeto ITMI (VALE) 15 mtpa (sinter feed e pellet feed)	
Projeto Vargem Grande (VALE) 16 mtpa (sinter feed e pellet feed)	

Fonte: ECM (2007).

Figura 5 - Impactos das características tecnológicas do minério de ferro nos resultados econômicos do projeto



Fonte: ECM (2007).

4.1 Cominuição

A liberação de partículas na indústria ocorre pela aplicação de grandes quantidades de energia mecânica em britadores e moinhos (TAVARES, 2009). Para Beraldo (1987) a cominuição é um conjunto de operações, que consiste em reduzir o tamanho das partículas por meio da quebra de ligações estruturais. No tratamento de minérios representa o primeiro estágio de processamento mineral. Os principais objetivos da fragmentação são promover a liberação das diferentes espécies minerais para posterior concentração do mineral de interesse, além disso, alcançar as especificações granulométricas definidas pelo cliente. De modo geral, as etapas de cominuição podem ser definidas em britagem e moagem.

A energia é o principal recurso utilizado nos processos de fragmentação e é quem define os custos operacionais e de investimento. O aproveitamento energético eficiente utilizado na cominuição influencia não somente nos lucros do empreendedor, mas também no consumo mundial de energia (DELBONI JÚNIOR, 2015).

Ainda de acordo com o autor supracitado, os custos inerentes à fragmentação estão relacionados com a granulação exigida. Quanto menor a granulometria especificada maior será o consumo de energia específica. Comparando as clássicas operações de fragmentação como desmonte, britagem e moagem, a energia específica aumenta em uma intensidade significativa nessa ordem. Assim, enquanto operações de desmonte de rocha, por explosivo, consomem cerca de 0,1 kWh/t, em britadores a energia específica aumenta para amplitudes de 1 kWh/t, alcançando valores da ordem de 10 kWh/t em circuitos de moagem. Em etapas conhecidas como pulverização, moagem fina ou micronização, o índice pode atingir até 100 kWh/t.

Calcula-se que a cominuição absorve atualmente cerca de 3% da energia consumida no mundo inteiro, e entre 30% a 50 % de toda a energia gasta em uma usina de tratamento. Para minérios mais compactos, abrasivos e/ou com liberação em frações muito finas este valor pode alcançar patamares muito maiores (VARELA, 2013).

Geralmente, os processos de cominuição para tratamento de minérios com teores elevados apresentam apenas circuitos de britagem, ou seja, a maior parte da produção brasileira não depende da cominuição intensiva. A cominuição intensiva de minérios de ferro só se fez indispensável com a decisão de aproveitar, mediante moagem, os itabiritos pobres do Quadrilátero Ferrífero (DELBONI JÚNIOR, 2015).

Para o aproveitamento dos itabiritos compactos torna-se necessário um processo de cominuição com granulometria mais fina, como a moagem, para individualização das partículas minerais e posterior concentração, no qual se obtém liberação suficiente entre os minerais-minério e os minerais de ganga (FERREIRA; SILVA; MARQUES, 2015).

Nos últimos anos, a indústria de fabricação de equipamentos de cominuição investiu bastante em dimensões maiores de britadores e, principalmente, moinhos. Esse crescimento foi motivado pela exaustão de jazidas com alto teor, o que levou as mineradoras a optar pela lavra de depósitos com teores mais baixos, porém, com elevadas taxas de produção (DELBONI JÚNIOR, 2015).

Atualmente, as etapas de britagem e moagem apresentam grande potência instalada e alta capacidade de processamento, quando comparadas com as configurações das usinas na década de 70 e 80, com britagens em vários estágios e muitas linhas de moagem operando em paralelo. (DELBONI JÚNIOR, 2015).

Porém, os princípios aplicados e a concepção mecânica de moinhos e britadores continuam essencialmente os mesmos. Dentre as inovações mais recentes é o moinho de rolos de alta pressão (HPGR- *High Pressure Grinding Rolls*) (DELBONI JÚNIOR, 2015).

4.2 Britagem

Figueira; Luz; Almeida, (2010), define a britagem como operação responsável pela fragmentação dos blocos obtidos na lavra, a partir de uma serie de diferentes tipos de britadores, até adequar o material a etapa subsequente.

Usualmente, são aplicados 4 estágios de britagem (primária, secundária, terciária e quaternária) como demonstra o quadro 1. A necessidade dos estágios de britagem são convenientes de acordo com a granulometria desejada ou maior liberação das partículas valiosas, ou seja, quanto mais fina a granulometria mais estágios podem ser empregados. Todavia, quanto menor o número de estágios, menores são os custos de investimento, operação e manutenção. Esta operação deve ser realizada com rigoroso controle em função de ser uma operação normalmente cara (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

Quadro 1 - Classificação dos Estágios de Britagem

Estágio de Britagem	Tamanho Máximo de Alimentação (mm)	Tamanho Máximo de Produção (mm)
Britagem Primária	1000	100
Britagem Secundária	100	10
Britagem Terciária	10	1,0
Britagem Quaternária	5	0,8

Fonte: Figueira; Luz; Almeida (2010).

Cada estágio pode trabalhar em circuito aberto ou fechado. Para os itabiritos compactos, o circuito de britagem na rota tradicional de cominuição demanda um número maior de britadores e peneiras, bem como equipamentos auxiliares (silos, correias transportadoras, alimentadores). Todos estes equipamentos aumentam o tamanho das instalações e a área impactada do projeto, além de onerarem, significativamente, o custo operacional (PINTO, 2016).

A fragmentação do minério nas etapas de britagem utiliza, principalmente, as forças de compressão e impacto para granulometrias mais grosseiras e abrasão para granulometrias mais finas. Na compressão a aplicação de esforços compressivos é lenta. Nas forças de impacto, a aplicação de esforços compressivos é em alta velocidade. E por último, nas forças de abrasão ocorre um esforço secundário ao aplicar esforços de compressão e de impacto (PINTO, 2016).

Segundo Chaves e Peres (2003) “A britagem tem, necessariamente, uma relação de redução pequena: as forças aplicadas são elevadas e a geometria do equipamento tem importância fundamental”.

Algumas limitações técnicas definem qual o tipo de britador deve ser aplicado no processo. Tais fatores podem ser mecânicos e operacionais, intrínsecos de cada tipo de equipamento, como a energia requerida, as forças envolvidas, o desgaste de componentes, a disponibilidade física, a taxa de produção máxima e as características físicas da matéria-prima. Tradicionalmente os equipamentos mais utilizados na britagem estão descritos no quadro 2 (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

Quadro 2 - Principais Tipos de Britadores e suas

Tipo de britador	Mandíbulas	Giratório	Cônico	Impacto	Martelos	<i>Stör</i>	Rolos Dentados
Serviço	Britagem 1ª e 2ª	Britagem 1ª	Britagem 2ª, 3ª e 4ª	Britagem 1ª, 2ª, 3ª e 4ª	Britagem 1ª, 2ª e 3ª	Britagem 1ª, 2ª e 3ª	Britagem 1ª e 2ª
Grau de Redução	5:1 (4:1 a 9:1)	8:1 (3:1 a 10:1)	3:1 a 7:1	6:1 a 40:1	20:1 a 100:1	3:1 a 6:1	2:1 a 6:1
Capacidade Processamento (t/h)	Baixa a média (até 1300)	Média a alta (até 10000)	Baixa a média (até 2400)	Baixa a média (até 2400)	Baixa a média (até 2800)	Média a alta (até 10000)	Média a alta (até 12000)
Tamanho máx. da alimentação (mm)	Grandes tamanhos (até 1500)	Grandes tamanhos (até 1600)	até 500	até 1500	até 1500	até 2000	Limitado a distância entre rolos (até 2500)
Granulometria do Produto	Poucos finos. Top size alto p/ lamelares	Poucos finos. Top size menor que mandíbulas	Distrib. granulom. uniforme, formato cúbico	Muitos finos, formato cúbico ou arredondado.	Muitos finos e formas cúbicas	Poucos grossos e teor de finos menor quando comparado c/ outros equip.	Tamanho médio a fino (baixa porcentagem), uniforme.
Aplicação	Duro e abrasivo, c/ sílica <30% e umidade <10%. Pouco indicado p/ minerais coesivos e c/ tendência a produzir partículas lamelares	Abrasivo, umidade <5% e c/ tendência a produzir partículas lamelares. Pouco indicado p/ minerais coesivos.	Duro e abrasivo e p/ umidade <8%. Pouco indicado p/ minerais coesivos.	Abrasivo c/ sílica+óx. metálicos <15%, umidade <5%, alto teor de argila, c/ tendência a produzir partículas lamelares. Limitado a rochas frágeis ou elásticas.	Dureza baixa a moderada, pouco abrasivo c/ sílica <3-8% e umidade <15-20%.	Dureza média, c/ sílica <10%, p/ umidade <30% e minerais coesivos e pegajosos.	Dureza baixa e média, pouco abrasivo c/ sílica <10%, umidade <30%, minerais coesivos, c/ tendência a produzir partículas lamelares
Resist. a Compressão (Mpa)	< 500	< 400	< 400	< 300	< 200	< 130	< 180

Características.

Fonte: Figueira; Luz; Almeida (2010).

De modo geral, para diferentes tipos de minério existe um britador adequado ou uma combinação destes, que atenda as necessidades de um projeto de britagem eficiente (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

No beneficiamento de minério de ferro, os britadores mais utilizados são os britadores de mandíbulas, giratórios e cônicos (PINTO, 2016).

4.3 Britador de Mandíbulas

O Britador de mandíbulas é o equipamento mais utilizado para a britagem primária em blocos que apresentam elevadas dimensões, dureza e grandes variações de tamanho. Exige a utilização de um alimentador e normalmente é recomendado quando não se deseja grande quantidade de finos no produto (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA; 2010).

O britador de mandíbulas constitui essencialmente de uma mandíbula fixa e uma móvel, ligada ao excêntrico, que fornece o movimento de aproximação e afastamento. Assim, o material da alimentação desce entre as mandíbulas enquanto sofre fragmentação com o impacto gerado pelo movimento (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA; 2010).

Podem ser classificados em dois tipos, conforme o movimento realizado pela mandíbula móvel: Britadores de um eixo (Dodge) e de dois eixos (Blake). No primeiro, o movimento realizado é de trajetória elíptica enquanto no segundo a mandíbula realiza movimento pendular (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA; 2010).

Os britadores de dois eixos são mais indicados especialmente para britar materiais extremamente abrasivos de difícil fragmentação (METSO, 2005) e apresentam maior custo de capital (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA; 2010). Porém, apresentam uma vida útil maior devido ao menor atrito entre as mandíbulas, que geralmente é ocasionado pelo arraste de material, já que neste caso o material britado desce somente por gravidade (METSO, 2005).

4.4 Britador Giratório

Equipamento bastante utilizado na britagem primária, de baixo consumo de energia e menor produção de finos. Pode ser alimentado diretamente por caminhões em ambos os lados (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

Os britadores giratórios são máquinas com eixo oscilante. A britagem ocorre quando o eixo principal (manto ou cone central), balança dentro da câmara de britado (bojo ou côncavo) com um movimento excêntrico, rotacionado por um conjunto coroa e pinhão.

O movimento circular de aproximação e distanciamento do cone central em relação à carcaça invertida faz com que toda a área da carcaça seja utilizada na britagem, o que fornece ao britador uma grande capacidade de operação (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

A distância mais curta entre o manto em movimento e os côncavos se denomina de abertura mínima (APF, Abertura Posição Fechada). Da mesma forma, a distância maior entre o manto e os côncavos se denomina abertura máxima (APA, Abertura Posição Aberta) (VALE, 2012a).

A variação da abertura do britador é realizada pelo hidroset, sistema responsável por elevar ou abaixar o eixo principal para ajustar a proximidade do manto com relação à câmara de britado (VALE, 2012a).

Segundo a Vale (2012a), o sistema do hidroset efetua três importantes funções:

- Proporcionar um fácil ajuste do britador, para compensar o desgaste dos revestimentos e controlar a granulometria do produto.

- Absorve as cargas de impacto com o acumulador hidráulico, na medida em que aumenta ou diminui a carga do britado.

- Aumenta o APF quando um objeto não triturável passa pelo britador.

Através de um movimento circular o material alimentado é comprimido em toda a extensão da carcaça sob ação do manto (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

Ocorre também uma trituração entre as próprias partículas comprimidas, resultando em menor desgaste dos revestimentos metálicos (METSO, 2005).

Os britadores giratórios possuem maiores capacidades de processamento devido à sua abertura de saída em forma circular e também ao princípio de operação contínua (METSO, 2005).

Apresentam bom desempenho para britar materiais de alta dureza e abrasividade, porém são limitados com materiais úmidos e que contêm quantidades significativas de argila (TAVARES, 2009).

4.5 Britador Cônico

Britadores cônicos são mais empregados nas etapas da britagem secundária, terciária ou quaternária, na produção de material com granulometria intermediária e fina. O equipamento é resistente e apresenta pouco desgaste de seus componentes. O perfil do revestimento influencia na granulometria do produto, ou seja, quanto mais horizontal o perfil do revestimento, mais fino será a granulometria (TAVARES, 2009).

A relação geométrica entre a altura do cone e o diâmetro da base define o ângulo do cone. Os equipamentos com maior ângulo de cone são denominados *standard*, e, com menor ângulo, de cone *short head* (PINTO, 2016).

O princípio de operação do britador cônico é semelhante ao do britador giratório. Entretanto, no cônico, o manto e o cone apresentam longas superfícies paralelas, para garantir um tempo longo de retenção das partículas nessa região (PINTO, 2016).

4.6 Moagem

O último estágio de cominuição é a moagem. Este processo consiste na fragmentação das partículas a um tamanho apropriado à liberação do mineral útil que comumente será concentrado nas etapas subsequentes (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA; 2010).

Segundo Delboni Júnior (2015), anteriormente para os minérios de alto teor, eram utilizados apenas circuitos de britagem e peneiramento. A moagem começou a ser utilizada no tratamento de minérios de ferro para o aproveitamento dos itabiritos do Quadrilátero Ferrífero.

A moagem é geralmente realizada em moinhos tubulares. Esses contêm em seu interior corpos moedores livres e em movimento para praticar a fragmentação do minério. Os tipos mais comuns de corpos moedores são barras, bolas, cilindros curtos (chamados Cylpebs) de aço, pedaços de rocha dura, ou em alguns casos, partículas do próprio minério. A denominação do tipo de moinho irá depender do tipo de corpos moedores nele usado (TAVARES, 2009).

Os tipos mais comuns são os moinhos de bola, moinhos de barra, moinhos autógenos (AG), estes últimos são os que utilizam blocos do próprio minério como corpo moedor, e moinhos semi-

autógenos (SAG) que utilizam bolas em conjunto com os blocos do minério como corpos moedores (PINTO, 2016).

Os moinhos de barras e bolas são os mais aplicados no processamento de minério de ferro, sendo avaliado como o investimento mais econômico do ponto de vista de consumo energético, porém com maior custo inicial (BERALDO, 1984 apud CHAGAS, 2008).

4.7 Moinho de Bolas

Os estágios finais de fragmentação são realizados em moinhos cilíndricos, usando bolas como meio moedor. Como as bolas têm maior área superficial, por unidade de peso, do que as barras são mais adequadas à moagem fina (FIGUREIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

As bolas no moinho junto com a carga de minério descrevem o regime de operação do moinho em cascata e catarata por efeito do tipo de revestimento utilizado. Os principais fatores que diferenciam os dois tipos de regime são o fator de enchimento (o volume ocupado pelas bolas em relação ao volume do moinho) e a velocidade (FIGUREIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

No regime catarata, a velocidade do moinho transporta as bolas até uma posição bem elevada e essas são jogadas sobre as outras bolas e sobre o minério causando fragmentação por impacto. Utilizam-se bolas com diâmetros maiores para aumentar a energia do meio moedor e menor fator de enchimento. Este regime é aplicado para a cominuição de material mais grosso e para evitar a produção de finos (FIGUREIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

No regime em cascata, as bolas alcançam uma determinada altura e rolam sobre as outras, quase não havendo impacto e sim, fragmentação por fricção. A velocidade baixa do moinho e o alto fator de enchimento são responsáveis por este tipo de regime, que é mais adequado para a obtenção de um produto final com granulometria fina (FIGUREIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

De acordo com Napier-Munn e outros, 1999 apud Pinto, 2016, os moinhos de bolas são o tipo mais comum e mais utilizado do moinho tubular, possivelmente porque eles operam com maior eficiência energética tanto em escala de laboratório, quanto em escala industrial.

Ribeiro e outros, 2002 apud Chagas, 2008 pesquisou sobre a influência da forma do corpo moedor, cylpebs e bolas, na eficiência da moagem para produção de ultrafinos. Segundo o autor, os testes industriais e da planta piloto foram os mesmos, exibindo uma melhoria de eficiência de moagem de cerca de 26%, quando trocou uma carga de cylpebs de 28 mm por uma de bolas formada por 50% de bolas de 30 mm e 50% de bolas de 40 mm de diâmetro.

Em relação aos corpos moedores citados, sabe-se que as bolas quando se chocam, utilizam todo seu peso para quebrar uma partícula que esteja entre elas, enquanto os cylpebs têm seu peso distribuído ao longo de seu corpo (FONSECA, 2007 apud CHAGAS, 2008).

As bolas de moinho são fabricadas com aço de alto carbono ou ferro fundido. Em alguns casos são adicionados elementos ligantes, como o cromo, para aumento da resistência mecânica e à corrosão. O diâmetro das bolas está relacionado com a malha de moagem e com o top size de alimentação (PINTO, 2016).

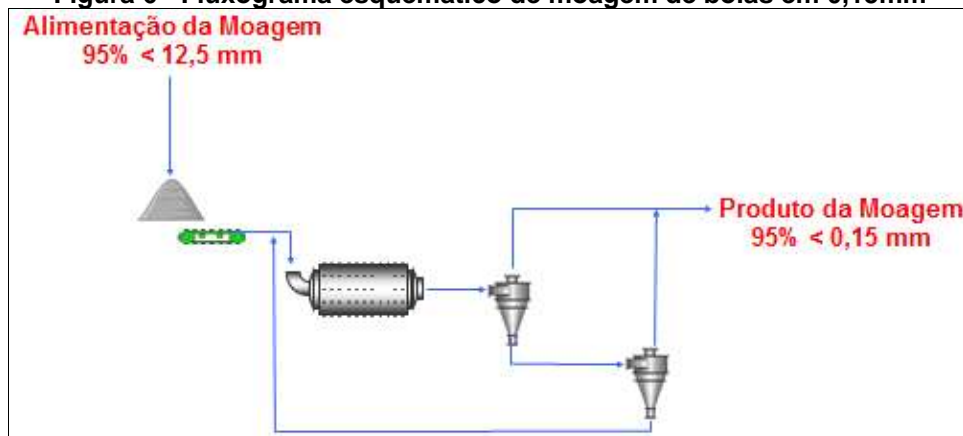
Para Napier-Munn, 2006 apud Pinto, 2016 o consumo de corpo moedor varia entre 0,1 kg/t até 1,0 kg/t de minério e depende, principalmente, das características do material, como dureza e abrasividade do minério, das especificações do tamanho das partículas e da qualidade do corpo moedor (tipo de aço utilizado). O gasto de corpo moedor pode ter um valor abundante e, em alguns casos, atingir até 40% do custo total de moagem.

O circuito de moagem pode ser aberto ou fechado. No circuito aberto o minério moído passa uma única vez pelo moinho e a taxa de alimentação deve ser menor para garantir a fragmentação das partículas (FONSECA, 2007 apud CHAGAS, 2008).

No circuito fechado o material moído é direcionado a um equipamento de classificação (hidrociclones) cujo, "underflow" retorna ao moinho. Até que se alcance a granulometria desejada, as partículas podem voltar consecutivas vezes aos moinhos. Este processo é denominado carga circulante e é normalmente, quantificado como porcentagem sobre a nova alimentação do moinho (FONSECA, 2007 apud CHAGAS, 2008).

São exemplos da utilização de moinhos de bolas no beneficiamento de itabiritos compactos, as usinas de Germano, localizadas em Mariana, Minas Gerais de propriedade da Samarco, e os novos circuitos em implantação de beneficiamento de itabiritos de Cauê e Conceição, localizados em Itabira, Minas Gerais de propriedade da Vale. A figura 6 mostra a rota convencional de moagem em 0,15 mm para minério de ferro em circuito fechado com duplo estágio de classificação (PINTO, 2016).

Figura 6 - Fluxograma esquemático de moagem de bolas em 0,15mm



Fonte: Pinto (2016).

4.8 Moinho de barras

São moinhos cilíndricos, que empregam barras como corpo moedor. Podem ser considerados equipamentos de britagem fina ou de moagem grossa, pois são adequados para suportar uma alimentação tão grossa quanto 50 mm e fornecer um produto tão fino quanto 500 μm (FIGUREIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

A característica principal do moinho de barra é que o comprimento do cilindro tem 1,25 a 2,5 vezes o diâmetro. Isso é necessário porque as barras têm somente poucos centímetros menores que o comprimento da carcaça e devem ser impedidas de se atravessarem dentro da mesma. Contudo a razão entre a secção cilíndrica e diâmetro do moinho não deve ser muito alta, pois isso ocasionaria o uso de barras muito compridas, com possibilidade a se deformarem (FIGUREIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

Tavares (2009) afirma que sua maior aplicação é como moagem primária em série com moagem secundária constituída por moinho de bolas. Esses tipos de moinhos possuem uma vantagem importante em relação aos outros tipos, uma vez que a ação moedora das barras tende a evitar a sobremoagem de partículas finas e, por esse motivo, podem ser operados adequadamente em circuito aberto.

No entanto, moinhos de barras são raramente utilizados na moagem ultrafina de minerais, uma vez que os esforços aplicados não são adequados para partículas muito finas. Isso ocorre porque o corpo moedor não produz energia suficiente para provocar maiores taxas de quebra de partículas finas (WELLENKAMP, 1999).

4.9 Separação por tamanho

As etapas do tratamento de minérios que separam as partículas minerais por seu tamanho são os métodos de peneiramento e classificação. Ambos têm como objetivo principal a separação do minério em duas ou mais frações, com partículas de tamanhos diferentes (LUZ, SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

A separação realizada pela etapa do peneiramento, leva em consideração o tamanho geométrico das partículas por ordem de tamanho, diferente da classificação cuja separação se baseia na velocidade que os grãos atravessam um meio fluido (LUZ, SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Como já mencionado anteriormente, a cominuição é responsável pela maior parte da energia consumida no processamento mineral. É importante destacar que a etapa de classificação geral, contribui para minimizar esse dispêndio quando associadas no processo de cominuição (ALBUQUERQUE, WHEELER e VALINE, 2013).

4.10 Peneiras

O peneiramento consiste em um processo mecânico em que se utiliza de uma superfície perfurada, denominada peneira (SOUZA, 2010). O material retido na tela da peneira é denominado *oversize* e o passante, *undersize* (CORREIA, 2010).

As peneiras podem operar tanto a seco, apenas com a umidade natural do material a ser peneirado, como a úmido, em que se adiciona água ao material. O peneiramento a úmido é utilizado para

materiais pouco úmidos ou muito aderentes a fim de facilitar a passagem dos finos na tela e evitar o entupimento da peneira (SOUZA, 2010).

Para Correia (2010), os equipamentos de peneiramento podem ser classificados em três tipos:

- Grelhas: São formadas por barras metálicas dispostas paralelamente, mantendo um espaçamento regular entre si;
- Crivos: São formados por chapas metálicas planas ou curvas, perfuradas por um sistema de furos de várias formas e dimensão determinada;
- Telas: São formadas por fios metálicos trançados geralmente em duas direções ortogonais, formando entre si "malhas" ou "aberturas" de dimensões determinadas. Podem ser quadradas ou retangulares.

Esses equipamentos também podem ser classificados, de acordo com o movimento da superfície de peneiramento, como estacionários ou dinâmicos (TAVARES, 2009).

A seleção e o dimensionamento do equipamento de peneiramento deve envolver a análise das características do material da alimentação e do tipo de serviço a que ela irá se prestar. Esta etapa é de suma importância nas usinas de beneficiamento exigindo muito cuidado para que as peneiras sejam do tamanho e tipo adequados ao processo (CORREIA, 2010).

4.11 Ciclones de classificação

A classificação consiste na separação de partículas de acordo com a velocidade em que estas atravessam um meio fluido. Nas operações de tratamento de minérios o meio fluido mais empregado é a água. Materiais muito finos, habitualmente são classificados por ciclones por não apresentarem boa eficiência no peneiramento (CORREIA, 2010).

O princípio de funcionamento dos classificadores resume-se em uma coluna de separação, na qual a água ascende a uma velocidade uniforme. As partículas presentes sobem ou descem de acordo com suas velocidades terminais. Desta forma, o material é separado em dois produtos: O *overflow*, composto por partículas com velocidade terminal menor que a velocidade do fluido e o *underflow* de partículas com velocidade terminal maior do que a velocidade do fluido. (WILLS, 2006).

Os classificadores mais empregados são os cones de sedimentação, classificadores mecânicos e hidrociclones (WILLS, 2006). Este último trata-se em um recipiente de formato cilíndrico-cônico, com um orifício de entrada, tangencial na parte superior da seção cilíndrica e dois orifícios de saída, localizados no seu eixo de simetria, uma na parte inferior da seção cônica, o *apex*, e outro na parte superior do cabeçote, o *vortex finder* (VALE, 2012b).

Em comparação aos outros classificadores, se destacam ao separar de forma mais eficiente o material alimentado (TAVARES, 2009).

O princípio de separação deste equipamento deve-se basicamente à força centrífuga criada pelo movimento circular separando as partículas finas das partículas grossas. As partículas maiores e pesadas são expulsas para as paredes, desde onde drenam para o *ápex*. As partículas mais leves são arrastadas com a maior parte da água para o *vórtex* do hidrociclone (VALE, 2012b).

Em resumo, os hidrociclones apresentam como principal vantagem sua grande capacidade, fácil controle operacional, e baixo custo de capital (TAVARES, 2009).

4.12 Peneiras de alta frequência

Estudos realizados por pesquisadores através dos anos demonstram que o maior potencial de melhoria no processo de cominuição pode ser alcançado através de uma boa classificação (ALBUQUERQUE, WHEELER; VALINE, 2013).

Segundo Albuquerque; Wheeler e Valine (2009), um grande avanço em *desing* de plantas de beneficiamento de minérios é a utilização das peneiras vibratórias de alta frequência. O emprego deste equipamento tem sido considerado como o fator mais importante para o bom desempenho dos circuitos de moagem.

Ainda segundo o autor, a substituição em escala comercial, de hidrociclones por peneiras de alta frequência possibilita um ganho significativo não só para a etapa de cominuição, mas também para as operações subsequentes tais como flotação e desaguamento gerando um melhor produto com maior grau de recuperação e redução de custos.

A capacidade da planta, os custos de energia e de disponibilidade de água desempenham um importante papel para determinar a tecnologia adequada à moagem e aos estágios de concentração. Por apresentarem maior eficiência neste sentido, atualmente as peneiras vibratórias são mais indicadas que os hidrociclones (ALBUQUERQUE, WHEELER; VALINE, 2013).

Ao operarem juntamente com moinhos em circuito fechado, estes equipamentos tem melhorado a eficiência de moagem e reduzindo o consumo de energia da planta, o consumo de reagentes na flotação, e a carga circulante além de aumentarem a recuperação metalúrgica (ALBUQUERQUE, WHEELER; VALINE, 2009).

Essas peneiras executam um movimento linear e dispõem de múltiplos decks de classificação individual dispostos de forma escalonada que funcionam em paralelo. Elas oferecem uma grande capacidade de tratamento em espaço reduzido (VALE, 2012c).

Albuquerque; Wheeler e Valine (2009) afirmam ainda que as principais características dessas peneiras são:

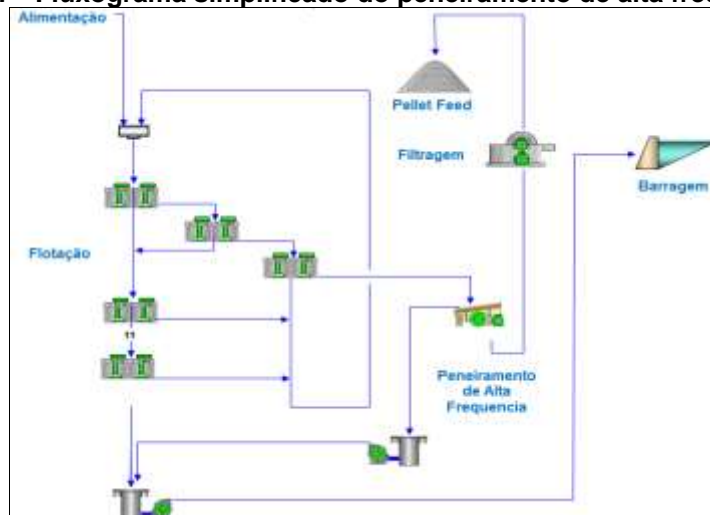
- Construção robusta e alta confiabilidade mecânica;
- Alta resistência ao desgaste;
- Elevada Eficiência;
- Baixo consumo de energia;
- Fácil manutenção;
- Oferece melhores resultados metalúrgicos.

Com o aumento dos custos de energia os benefícios em otimizar os circuitos de cominuição com uma boa classificação através do uso de peneiras de alta frequência, é hoje, uma realidade necessária em plantas de beneficiamento de minérios (ALBUQUERQUE, WHEELER; VALINE, 2013).

Atualmente há no mercado peneiras de alta frequência como, por exemplo, a *Starck Sizer* que operam com grandes capacidades e apresentam eficiência acima de 90% (SOUZA, 2010).

Com o objetivo de retirar partículas grossas de sílica, atualmente encontram-se instaladas e operando em algumas usinas da mineradora Vale S.A as peneiras de alta frequência para o tratamento de itabiritos pobres. A aplicação incide na etapa após a flotação, ou seja, retirar essas impurezas contidas no concentrado da flotação, das minas de Conceição, Cauê e Brucutu. A figura 7 demonstra o fluxograma simplificado do processo utilizado na usina II de Conceição da Vale para tratamento de itabiritos compactos (BRAGA JUNIOR, 2010).

Figura 7 - Fluxograma simplificado do peneiramento de alta frequência



Fonte: Vale (2012c).

4.13 Concentração

A concentração de minério de ferro consiste na separação das espécies minerais úteis (ferro) em um concentrado e as não úteis (ganga) em rejeito. Para que a concentração mineral ocorra é necessário que algumas características e propriedades das partículas sejam definidas. De forma geral, as principais são: liberação das diferentes espécies minerais, adequação granulométrica e propriedades diferenciadoras (ARAÚJO et al., 2008).

De acordo com Araújo e outros (2008) as diferentes propriedades (físicas ou físico-químicas) entre o mineral de interesse e os minerais de ganga são determinantes para que haja a concentração. Os

diversos métodos específicos de concentração estão diretamente relacionados com essas propriedades diferenciadoras como demonstra o quadro 3.

Quadro 3 - Métodos de concentração baseado na propriedade diferenciadora dos minerais

PROPRIEDADES	MÉTODOS
Óticas (cor, brilho, fluorescência)	Escolha ótica (manual ou automática)
Densidade	Líquido denso, meio denso, <u>líquidos</u> , mesas, <u>espirais</u> , cones, cilindros de meio denso, DWP, bateias, calhas, calhas estranguladas, classificadores, hidrosseparadores, concentradores centrífugos etc.
Forma	idem métodos baseados na densidade
Susceptibilidade magnética	<u>Concentração magnética</u>
Condutividade elétrica	Separação eletrostática ou de alta tensão
Radioatividade	Escolha com contador
Textura/friabilidade	Cominuição seguida de classificação ou hidrosseparação ou peneiramento
Reatividade química	Hidrometalurgia
Reatividade de superfície	<u>Flotação</u> , agregação ou dispersão seletiva, eletroforese, aglomeração esférica

Fonte: Araújo et al., (2008).

Cada método de concentração trabalha com determinadas faixas de tamanhos específicas. Desta forma, a qualidade granulométrica dos principais produtos de minério de ferro (granulados, *sinter feed* e *pellet feed*) são definidas de acordo com o método utilizado (ARAÚJO et al., 2008).

4.14 Flotação

O processo de flotação possui propriedades e mecanismos diferentes dos outros métodos de concentração, gravítica (densidade, tamanho e forma) e magnética (susceptibilidade magnética). A diferenciação entre as espécies minerais está relacionada com suas diferentes propriedades de superfícies, fenômeno que permite a concentração dos minerais úteis e rejeição da ganga. Estas propriedades podem ser de caráter próprio das partículas ou induzida, por meio de adição de reagentes específicos (CHAVES; FILHO; BRAGA, 2010).

Segundo Peres e Araújo (1995), os ramos da ciência que estudam as características de superfície são conhecidos como “Físico-química das Interfaces”, “Química de Superfície”, “Química das Interfaces”, ou “Propriedades das Interfaces”.

Ainda de acordo com o autor anterior as três condições básicas para que ocorra a concentração dos minerais são a liberabilidade, separabilidade dinâmica e diferenciabilidade, sendo a última aquela que possui um dos mais importantes papéis e um dos campos mais amplos de investigação. Parte-se do princípio que as partículas a serem flotadas estão completamente liberadas e que as máquinas de flotação são capazes de garantir a suspensão das partículas e aeração apropriada da polpa, logo, é necessário, promover diferentes características de superfícies entre as partículas minerais úteis e as de ganga.

De acordo com Peres e Araújo (1995), a seletividade do processo de flotação está relacionada aos distintos graus de hidrofobicidade da superfície mineral. Partículas mais hidrofóbicas possuem aversão por água. O conceito adverso à hidrofobicidade é denominado como hidrofiliabilidade, ou seja, aquelas partículas que possuem maior afinidade por água (umectabilidade ou “molhabilidade”).

Na flotação “reversa” de minério de ferro, diferente da flotação “direta”, as espécies flotadas (coletadas pela espuma), são os minerais de ganga, principalmente o quartzo. Os minerais-minério (óxidos e hidróxidos de ferro), como estão presentes em maior quantidade, são sedimentados para o fundo da célula e constituem o concentrado (PERES; ARAÚJO, 1995).

Para Peres e Araújo (1995) o tamanho máximo da partícula é aquele que possibilite o transporte pelas bolhas de ar, esse fator passa a governar a granulometria da alimentação. A prática da flotação reversa de minério de ferro demonstra que o tamanho máximo de partícula é de 0,15mm, na maioria das plantas de tratamento.

O limite inferior do tamanho das partículas está ligado com o conceito de lamas (partículas abaixo de 10µm). Tradicionalmente, as lamas são prejudiciais na flotação de minério de ferro, portanto a deslamagem se torna fundamental (PERES; ARAÚJO, 1995).

A presença de lamas na flotação desenvolve um fenômeno comum, conhecido como “*slimes coating*”, que é o revestimento da superfície de um mineral por lamas de outras espécies. Isto modifica a rigidez da espuma, interfere no contato bolha-mineral e torna pouco efetiva o desempenho dos reagentes, por suas interações com as lamas, que possuem maiores áreas superficiais quando comparadas com as das partículas do minério (PERES; ARAÚJO, 1995).

O produto da flotação de minério de ferro é o *pellet feed*. Sua qualidade química deve possuir o maior teor de ferro e os menores teores de contaminantes (SiO_2 , Al_2O_3 , P, Mn) possível, para atender os processos de pelletização e redução nas siderurgias. Normalmente as faixas de especificação do produto considerado de melhor qualidade é o *pellet feed* tipo especial, contendo teor de ferro acima de 68% e teor de sílica abaixo de 0,8% (SALES, 2012).

A adição de reagentes específicos na flotação é responsável pela diferenciabilidade entre as partículas. Estes reagentes podem ser classificados como coletores, depressores, espumantes, ativadores, reguladores de pH, dispersantes, entre outros (SALES, 2012).

Basicamente se utiliza amina como coletor e o amido (de milho ou de mandioca) como depressor no beneficiamento de minério de ferro. O pH geralmente trabalha entre 10 a 10,5, e pode ser regulado pela adição de soluções básicas, como a soda cáustica – NaOH e/ou de substâncias que geram soluções ácidas, tal como o CO_2 líquido (SALES, 2012).

As células de flotação são os equipamentos utilizados para a separação entre partículas hidrofílicas versus hidrofóbicas. Esses equipamentos devem gerar condições hidrodinâmicas adequadas à agitação da polpa, disseminação de bolhas de ar na polpa, choque entre partículas e bolhas seguidas de aderência seletiva das partículas hidrofóbicas às bolhas de ar. A adesão resulta na associação de partículas e bolhas que, se resistirem à turbulência existente no equipamento, vão flotar, transportando as partículas hidrofóbicas até uma camada de espuma existente no topo das células de flotação, onde as mesmas serão extraídas do sistema (LIMA, 2009).

Ainda de acordo com o autor supracitado, uma vez ajustados os fatores físico-químicos, são as condições hidrodinâmicas que governam o desempenho do processo, por meio das células de flotação (coluna, mecânica ou pneumática), geometria e condições operacionais (vazão de polpa, vazão de ar, rotação do impelidor, distribuição dos tempos de residência, status da suspensão de sólidos). Dois tipos de equipamentos são hoje majoritariamente utilizados em escala industrial: células mecânicas e colunas de flotação.

Segundo Li e outros (1993) apud Vieira, A. (2005), os princípios básicos da flotação de partículas podem ser divididos em duas áreas principais: Química de superfície e hidrodinâmica.

A química de superfície inclui:

- Interações;
- Energia;
- Adsorção em interfaces;
- Molhabilidade natural de minerais;
- Uso de reagentes para tornar hidrofóbicas as superfícies minerais.

A hidrodinâmica inclui:

- Dispersão das bolhas de ar;
- Suspensão de sólidos;
- Colisão e adesão entre partículas minerais e bolhas de ar;
- Estabilidade do agregado partícula-bolha.

Ressalte-se que o tamanho da partícula é de considerável importância no âmbito da hidrodinâmica da polpa.

4.15 Células mecânicas

Células mecânicas de flotação são as máquinas mais empregadas no tratamento de minérios ao redor do mundo. Sua função principal se baseia no movimento de um rotor que promove os seguintes fenômenos (EK, 1992):

- Suspensão dos sólidos;
- Dispersão do ar introduzido em pequenas bolhas;
- Agitação turbulenta, proporcionando a colisão partícula-bolha;
- Transferência de polpa de uma célula para outra num circuito em série;
- Formação de uma camada de espuma no topo das células.

No interior da célula de flotação é instalado um rotor suspenso por um eixo interligado a um sistema de acionamento eletromecânico e envolvido por um estator, que possui a função de bloquear o movimento rotacional da polpa na célula e gerar a dispersão do ar (CHAVES; FILHO; BRAGA, 2010).

O giro do rotor faz com que a polpa seja deslocada na direção do estator, alcançando determinada altura, a partir da qual a polpa experimenta um movimento descendente, quando é novamente aspirada e direcionada para cima. Este giro também provoca uma pressão negativa dentro do equipamento, isto é, suficiente para sugar o ar da atmosfera para o interior da flotação, daí a necessidade de um tubo comum para o rotor e a passagem de ar. As células que trabalham desta forma são denominadas de autoaeradas, neste tipo de equipamento a velocidade do rotor e a taxa de aeração não são independentes, isto é, existe impossibilidade de modificação de uma delas sem que isso não ocasione uma mudança na outra (CHAVES; FILHO; BRAGA, 2010).

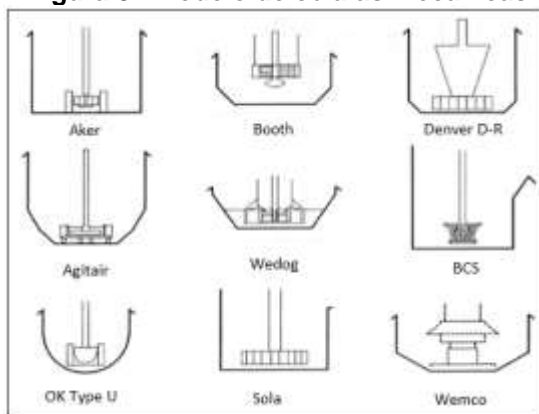
Existem células mecânicas cuja aeração é forçada, ou seja, o ar comprimido é injetado no sistema por meio de compressor externo. Neste tipo de equipamento, a rotação do rotor e a vazão de ar são independentes, ou seja, a mudança na intensidade de uma delas não afeta a outra (CHAVES; FILHO; BRAGA, 2010).

Segundo Wills (2006) os principais parâmetros para avaliar a performance de células de flotação são:

- Desempenho metalúrgico (recuperação e teor);
- Capacidade, expressa em toneladas tratadas por unidade de volume;
- Consumo de energia por tonelada de material tratado;
- Aspectos relacionados aos custos de aquisição, operacionais e de manutenção.

Existem diferentes tipos de células mecânicas de flotação. A Figura 8 esboça as principais geometrias de rotores utilizados nas máquinas (LEAL FILHO, 2000 apud LIMA, 2009).

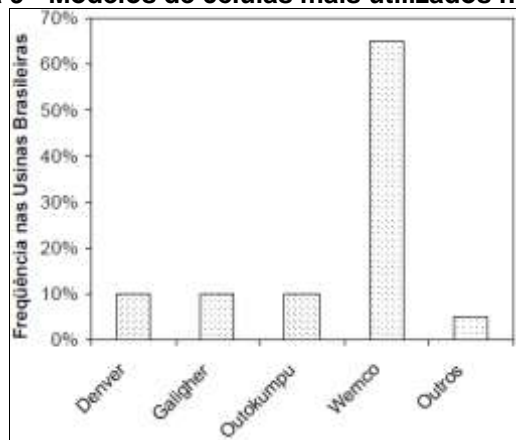
Figura 8 - Modelo de células mecânicas



Fonte: Leal Filho 2000 apud Lima (2009).

Ainda de acordo com o autor anterior, no Brasil a maioria das células mecânicas de flotação operando em circuitos industriais é do tipo células Wemco, como mostra a figura 9.

Figura 9 - Modelos de células mais utilizados no Brasil



Fonte: Leal Filho 2000 apud Lima (2009).

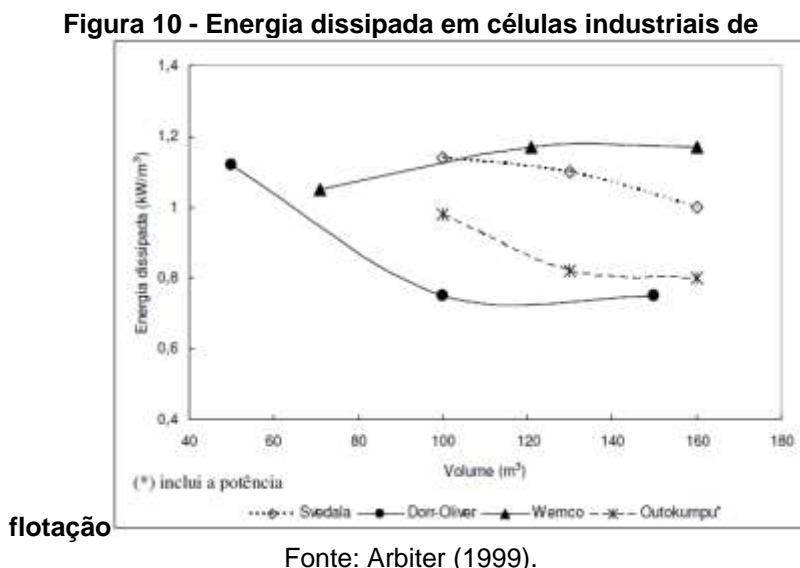
Células mecânicas de flotação evoluíram expressivamente no sentido de aumentar sua capacidade nas últimas quatro décadas, devido à necessidade de maiores produções e "layout". Este aumento é o resultado de inúmeras pesquisas dos fatores hidrodinâmicos (velocidade superficial do ar,

circulação de polpa e grau de mistura durante o dimensionamento) e como eles influenciam na eficiência (ARBITER, 1999).

Atualmente o mercado oferece modelos de células para grandes volumes chamadas *Tankcell*. Com volumes superiores a 160 m³, o *TankCell* é uma célula cilíndrica com fundo chato, possui um rotor semi-esférico e um estator montado no fundo do tanque. É capaz de fornecer um excelente nível de homogeneização da polpa e dispersão do ar. O *TankCell* apresenta uma flotação efetiva para todos os tamanhos de partículas, em função de suas configurações geométricas: Célula, rotor e estator, que permitem um ambiente hidrodinâmico otimizado, com redução da energia dissipada pelo rotor, porém, sem perder a capacidade de suspensão dos sólidos (GORAIN; FRANZIDIS; MANLAPIG, 2000).

Segundo Schubert (1999) a redução da energia dissipada ou da potência das células mecânicas, possibilita geração de bolhas maiores e a estabilidade dos conjuntos partícula-bolha aumenta. Ao mesmo tempo, as forças turbulentas são diminuídas. Este fato explica a boa recuperação das partículas grossas em rotações baixas.

A figura 10 apresenta a energia dissipada pelo rotor para diferentes células industriais de vários volumes, confirmando o crescimento da energia dissipada em células com capacidade menores, que por sua vez, propiciam um ambiente hidrodinâmico nocivo à flotação de partículas grossas. Por outro lado, o aumento do volume das células nos últimos anos proporcionou um melhor desempenho da flotação de grossos (ARBITER, 1999).



4.16 Colunas de flotação

A coluna de flotação emprega o sistema de fluxo contracorrente de polpa e bolhas de gás (geralmente ar) em um regime de fluxo próximo do laminar. Este equipamento difere das células convencionais que utilizam um fluxo concorrente e um regime turbulento. Por isso, as colunas contêm duas zonas distintas, a zona de coleta ou de recuperação e a zona de espuma ou de limpeza (CARVALHO, W., 2003).

O princípio de funcionamento consiste em alimentar a polpa no terço superior da coluna e injetar o ar na sua parte inferior. Isso possibilita a adesão das partículas sólidas que sedimentam na polpa com as bolhas ascendentes. As partículas coletadas são arrastadas para a zona de espuma e na sequência serão descartadas. Pode-se utilizar uma água de lavagem contra o fluxo de ascensão para evitar arraste mecânico das partículas finas (FUESTENAU AND HAN, 2003 apud SILVA, 2015).

A coluna diferencia das células convencionais por dois aspectos: O mecanismo de geração de bolhas e a presença de água de lavagem. Ela também não possui sistema de agitação, entretanto existem projetos de colunas com agitadores mecânicos, que são pouco empregados industrialmente (DOBBY, 2002).

As bolhas são formadas no fundo da coluna, perante a injeção de ar através de aerador denominado como "*sparger*", ou, também, pode-se injetar diretamente as bolhas de ar, produzidas através de um mecanismo gerador externo. A água de lavagem é adicionada na zona de espuma por uma série de canos perfurados localizados acima do coletor de espuma (DOBBY, 2002).

Na flotação em coluna, podem ser observadas duas zonas as quais são diferentes pelas suas propriedades. Tais zonas são a zona de coleta e a zona de espuma ou de limpeza (DOBBY, 2002).

A zona de coleta ou de recuperação fica compreendida entre a interface polpa/ espuma e os aspersores de gás. Nesta zona, o fluxo de partículas de ganga encontra um fluxo de bolhas ascendentes e as mesmas se interagem causando a coleta das partículas minerais hidrofóbicas (DOBBY, 2002).

A zona de espuma ou de limpeza corresponde ao volume situado entre a entrada da alimentação e o descarte do flotado. Nesta zona ocorre o contra fluxo de partículas minerais hidrofóbicas aderidas as bolhas de gás (DOBBY, 2002).

Tanto a altura da zona de coleta, quanto a da zona de espuma podem ser alteradas com o propósito de melhorar a recuperação. A zona de espuma é uma área de grande importância na flotação colunar, uma vez que a capacidade de carregamento é definida nessa região, podendo fornecer informações sobre o funcionamento do equipamento (DOBBY, 2002).

Phillips (1998) apud Vieira, A. (2005) pesquisou sobre o comportamento de partículas grossas através de coluna de flotação transparente de laboratório. Ele averiguou que essas partículas aderidas a bolhas se soltavam durante o seu transporte da polpa para a espuma. Concluiu-se então, que o problema com a flotação de partículas grossas não é a habilidade para fixá-las à bolha, mas a dificuldade de permanecerem fixadas à bolha ao longo da zona de coleta.

Segundo Li e outros (1993) apud Vieira, A. (2005), alguns parâmetros devem ser estudados antes do agregado partícula-bolha ser formado e flotado. Esses parâmetros seriam:

- As forças de adesão devem ser fundamentalmente maiores que as forças que atuam contrariamente no agregado partícula-bolha;

- A força elástica resultante da força de gravidade evidenciada pela partícula não deve superar a estabilidade da bolha;

- A densidade do agregado deve ser expressivamente menor que a da fase líquida;

- O agregado deve ser capaz de resistir às forças de cisalhamento resultantes da turbulência do fluxo.

Essas condições ficam mais complicadas de desempenhar com o aumento do tamanho da partícula.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com os dados levantados observou-se que:

Os custos para processar minério de ferro de baixo teor como os itabiritos compactos são maiores, principalmente, em função das extensivas etapas de cominuição que demandam maiores gastos de energia para liberação das partículas de ferro e sílica nas frações grossas.

O rendimento em massa das usinas é baixo, devido maior taxa de alimentação e geração de rejeitos.

No processo de cominuição somente os circuitos de britagem, não são suficientes para adequar os tamanhos das partículas, sendo necessária a inclusão da moagem para complementar a fragmentação e liberação.

A rota de processos para tratamento dos itabiritos compactos envolve, basicamente, cominuição de todo o ROM, seguido pelas etapas de classificação e flotação, com a produção somente de Pellet Feed.

Os equipamentos no processo de cominuição mais utilizados no tratamento de minério de ferro são os britadores giratórios, mandíbulas, cônicos, moinho de bolas e barras. O funcionamento e a mecânica destes equipamentos são praticamente os mesmos para qualquer tipo de minério de ferro. Entretanto, para o tratamento de itabiritos compactos aplicam-se maior número de equipamentos com capacidades mais altas. O número de estágios de britagem e moagem também aumentam para a produção de material ultrafino, conseqüentemente mais liberado.

O britador giratório é mais adequado do que o britador de mandíbulas para o tratamento de itabiritos compactos porque ele se destaca em alguns aspectos: Maior grau de redução, maior capacidade de processamento, ponto de basculamento em ambos os lados além do bom desempenho para britar materiais de alta dureza e abrasividade.

O britador cônico é amplamente utilizado nos estágios da britagem secundária, terciária e quaternária na produção de material como granulometria intermediária e fina.

O moinho de bolas é mais adequado do que o moinho de barras devido às bolas terem maior área superficial, por unidade de peso, do que as barras sendo mais adequadas à moagem fina.

Os moinhos de barras são raramente utilizados para processar ultrafinos, porque os corpos moedores não produzem energia suficiente para provocar maiores taxas de fragmentação de partículas finas.

O circuito da moagem de bolas mais aplicado é o fechado, onde o material moído é direcionado a um equipamento de classificação (hidrociclones) cujo, "underflow" retorna ao moinho quantas vezes forem necessárias até que se alcance a granulometria desejada.

A etapa de classificação geral contribui para minimizar o consumo de energia quando associadas no processo de cominuição.

Os equipamentos de peneiramento mais aplicado são as peneiras quadradas ou retangulares, composta por telas, formando entre si malhas de dimensões determinadas. O funcionamento e a mecânica destes equipamentos são praticamente os mesmos para qualquer tipo de minério de ferro. Entretanto, para o tratamento de itabiritos compactos aplicam-se maior número de equipamentos com capacidades mais altas.

Os hidrociclones apresentam como principal vantagem sua grande capacidade, fácil controle operacional, e baixo custo investimento. Em comparação aos outros classificadores, se destacam ao separar de forma mais eficiente o material alimentado.

A utilização das peneiras vibratórias de alta frequência tem sido amplamente utilizada após a flotação, pois apresenta bom desempenho para retirar partículas grossas de sílica com menor número de equipamento, além de minimizar o consumo de reagentes na flotação.

Os reagentes utilizados na flotação para o tratamento de itabiritos compactos, ainda são os mesmos aplicados em outros processos de minério de ferro, porém com maior consumo devido a quantidades maiores de contaminantes. Basicamente se utiliza amina como coletor e o amido (de milho ou de mandioca) como depressor. O pH geralmente trabalha entre 10 a 10,5, e pode ser regulado pela adição de soluções básicas, como a soda cáustica – NaOH e/ou de substâncias que geram soluções ácidas, tal como o CO₂ líquido.

As células mecânicas do tipo Tankcell estão sendo mais aplicadas do que as colunas de flotação, pois apresentam um bom desempenho para todos os tamanhos de partículas, em função de suas configurações geométricas. Elas evoluíram expressivamente em termos de capacidade, fatores hidrodinâmicos e layout.

As colunas de flotação possuem melhor desempenho com partículas finas, pois as partículas grossas possuem dificuldade de permanecerem fixadas à bolha ao longo da zona de coleta. Isso justifica a maior utilização das células mecânicas, pois apesar da cominuição extensiva dos itabiritos compactos, a fração de partículas grossas (> 0,15mm) tem percentual considerável no processo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O minério de ferro apresenta grande importância para a balança comercial brasileira. Uma questão atual refere-se à degradação das reservas de minério de ferro. A tendência na diminuição dos teores de ferro faz com que sejam avaliadas mudanças na rota de processo de plantas de tratamento de minérios de Ferro. Este trabalho apontou quais as tendências tecnológicas para o processamento e recuperação de minérios pobres como os itabiritos compactos.

Com o objetivo de embasar o leitor com os conhecimentos necessários, mediante pesquisa bibliográfica, foram apresentados os principais conceitos envolvidos no aproveitamento de jazidas e nos processos de beneficiamento de minérios de ferro bem como a evolução destes processos ao longo dos anos e as principais mineradoras que processam minérios de baixo teor na atualidade.

Como já apontado nos resultados da pesquisa, há uma tendência produtiva em se explorar grandes volumes de minério devido ao baixo teor para se obter recuperações necessárias. Nessas condições, maiores custos serão incorridos devido à maior intensidade dos investimentos e maior complexidade das operações de mineração e beneficiamento.

Diante deste cenário, é primordial que o engenheiro de minas conheça os parâmetros que envolvem o beneficiamento de minérios de baixo teor, sendo entendedor dos custos envolvidos. Além do conhecimento sobre os processos e os equipamentos mais utilizados, para um correto dimensionamento da planta, o engenheiro deve levar em consideração dados como a tonelagem e os teores da reserva, o custo de produção, o preço futuro da comercialização do produto e a vida útil do projeto.

Em face do potencial mineral que o Brasil possui, um desafio de longo prazo é o investimento no desenvolvimento de equipamentos de mineração, visto que hoje são produzidos por países industrialmente mais desenvolvidos e importados para o Brasil, ou fabricados no país sob licença. O domínio desse segmento aliado ao número de jazidas existentes levaria o país a um destaque de líder mundial na mineração.

REFERÊNCIAS

ALBUQUERQUE, Laércio G.; WHEELER, Jobe E.; VALINE, Steven B. High frequency vibrating screens in closed grinding Circuits. Goiânia/GO. In: XXV ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 2013. Goiânia. Disponível em:

<http://searchentmme.yang.art.br/download/2013/classifica%C3%A7%C3%A3o-classification_and_screening/2333%20-%20ALBUQUERQUE,%20L.G.-%20HIGH%20FREQUENCY%20VIBRATING%20SCREENS%20IN%20CLOSED%20GRINDING%20CIRCUITS.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2016.

ALBUQUERQUE, Laércio G.; WHEELER, Jobe E.; VALINE, Steven B. Application of High Frequency Screens in Closing Grinding Circuits. Goiânia/GO. In: XXIII ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA, 2009. Goiânia. Disponível em: <http://searchentmme.yang.art.br/download/2009/cominui%C3%A7%C3%A3o/1927%2020La%C3%A9rcio%20G.%20Albuquerque_Jobe%20E.%20Wheeler_Steven%20B.%20Valine%20-0APPLICATION%20OF%20HIGH%20FREQUENCY%20SCREENS%20IN%20CLOSING%20GRINDING%20CIRCUITS.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2016.

ARBITER, Nathaniel. Development and scale – up of large flotation cells, in Advances in Flotation Technology. EUA, 1999. Disponível em:< https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=jpHzxNoMpqSC&oi=fnd&pg=PA345&dq=Development+and+scale++up+of+large+flotation+cells+Advances+in+Flotation+Technology&ots=leZo7T9auP&sig=Xmf85-jzndNypxsAQEAXF4wmKl4&redir_esc=y#v=onepage&q=Development%20and%20scale%20-%20up%20of%20large%20flotation%20cells%20Advances%20in%20Flotation%20Technology&f=false> Acesso em: 25 set. 2016

BERALDO, J. L. Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1987.

BRAGA JÚNIOR, Manoel Marques. Efeito do scalping de quartzo grosso na flotação catiônica reversa de minério de ferro. Belo Horizonte: UFMG, 2010. Disponível em:< http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/MAPO-88NQ75/manoel_m._b._j_nior.pdf?sequence=1> Acesso em: 25 set. 2016.

CARVALHO, Bruno César Lage de. Aproveitamento de Minérios de Ferro de Baixo Teor: tecnologias utilizadas e influências no sequenciamento de lavra. Ouro Preto: Repositório UFOP, 2012. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2346/1/DISSERTA%C3%87%C3%83O_AproveitamentoMin%C3%A9riosFerro.pdf>. Acesso em: 21 abr. 2016.

CARVALHO, Pedro Sérgio Landim et al. Minério de Ferro. In: BNDES. Insumos Básicos. [S.l.]: BNDES, 2014. Setorial, vol. 39. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set3906.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2016.

CARVALHO, William Ricardo. Flotação colunar reversa de minério de ferro: o efeito da granulometria da sílica. Ouro preto: UFOP, 2003. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/3077/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_Flota%c3%a7%c3%a3oColunarReversa.pdf>. Acesso em: 20 set. 2016.

CHAGAS, Tays Torres Ribeiro das. A moabilidade na moagem secundária de pellet-feeds de minérios de ferro em função da mineralogia, química, e microestrutura. Ouro preto: UFOP – CETEC – UEMG, 2008. (Dissertação de mestrado). Disponível em: <<http://www.redemat.ufop.br/arquivos/dissertacoes/2008/a%20moabilidade%20na%20moagem.pdf>>. Acesso em: 20 ago. 2016.

CHAVES, Arthur Pinto; FILHO, Laurindo de Salles L.; BRAGA, Paulo Fernando A. Flotação. Capítulo 11. In: LUZ, A. B. SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A. Tratamento de minérios. 5ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM-CNPq-MCT, 2010. Disponível em: <http://www.cetem.gov.br/livros/item/download/101_cd131eb39b89c289df55cdbaad231260> Acesso em: 13 set. 2016.

CHAVES, Arthur Pinto; PERES, Antônio Eduardo Clark. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios – Britagem, Peneiramento e Moagem. Volume 3, 2. São Paulo: Signus Editora, 2003.

CORREIA, Júlio Cesar Guedes. Classificação e Peneiramento. Capítulo 6. In: LUZ, A. B. SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A. Tratamento de minérios. 5º. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/livros?start=20>>. Acesso em: 29 ago. 2016.

DELBONI JÚNIOR, Homero . Cominuição. In: FERNANDES, F. R. C. (Ed) et al. Tendências Tecnológicas Brasil 2015: Geociências e Tecnologia Mineral/Eds. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2015. Disponível em:< http://www.cprm.gov.br/publique/media/ten_tecno_brasil.pdf>. Acesso em 22 mai. 2013.

DOBBY, Glenn. Column flotation. SGS Minerals services. EUA, 2002. Documento técnico. Disponível em: < http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=0ahUKEwj5-ndoaXPAhXBGpAKHTfWAakQFgg8MAE&url=http%3A%2F%2Fwww.sgs.com%2F-%2Fmedia%2Fglobal%2Fdocuments%2Fflyers-and-leaflets%2Fsgs-min-wa340-column-flotation-en-11.pdf&usq=AFQjCNGb6EYbQWX7_LC9iDfj-wEj509hvQ> Acesso em: 03 set. 2016.

ECM CONSULTORIA EM PROJETOS INDUSTRIAIS. Desenvolvimento de Processos para Aproveitamento dos Itabiritos Friáveis de baixo teor e dos Itabiritos Compactos – O Ponto de Vista de Engenharia de Projetos. Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <<http://ibram.org.br/sites/1300/1382/00000553.pdf>>. Acesso em: 27 mai. 2016.

EK, C. Flotation kinetics. In: Inovations In Flotation Technology. MAVROS, P.; MATIS, K. A. Kluwer Academic Publishers, 1992. Disponível em: <http://download.springer.com/static/pdf/416/bfm%253A978-94-011-2658-8%252F1.pdf?originUrl=http%3A%2F%2Flink.springer.com%2Fbook%2Fbfm%3A978-94-011-2658-8%2F1&token2=exp=1476842416~acl=%2Fstatic%2Fpdf%2F416%2Fbfm%25253A978-94-011-2658-8%25252F1.pdf%3ForiginUrl%3Dhttp%253A%252F%252Flink.springer.com%252Fbook%252Fbfm%253A978-94-011-2658-8%252F1*~hmac=d89997947e6dd2f696b886af998519c04a3b7fe9a57a63f90e07ad0e5d30c93a> Acesso em: 30 set. 2016.

FERREIRA, Rodrigo Fina; SILVA, Regisvander Gomes; MARQUES, Michelles Lacerda Sales. Relação entre grau de metamorfismo e malha de liberação de itabiritos compactos do Quadrilátero Ferrífero. In: Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração. São Paulo: ABM, abr.-jun. 2015. Vol. 12, nº 2. ISSN 2176-1523. Disponível em: <<http://tecnologiammm.com.br/doi/10.4322/2176-1523.0868>>. Acesso em: 29 mai. 2016.

FIGUEIRA, Hedda Vargas de O. LUZ, Adão B., ALMEIDA, Salvador L. Matos. Britagem e Moagem. Capítulo 4. In: LUZ, A. B. SAMPAIO, J. A., FRANÇA, S. C. A. Tratamento de minérios. 5ª Edição. Rio de Janeiro: CETEM-CNPq-MCT, 2010. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/livros?start=20>> Acesso em: 10 ago. 2016.

GIL, Antônio Carlos. Métodos e Técnicas de Pesquisa Social. 6º ed. São Paulo: Atlas, 2008. Disponível em: <http://www.uece.br/nucleodelinguasitaperi/dmdocuments/gil_metodos_de_pesquisa.pdf>. Acesso em: 29 mai. 2016.

GOMES, Marcos Antônio. Caracterização tecnológica no aproveitamento do rejeito de minério de ferro. Ouro Preto: UFOP. 2009. Dissertação de mestrado. Disponível em:< <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp115011.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2016.

GORAIN, B. K.; FRANZIDIS, J. P.; MANLAPIG, E. V .Flotation Cell Design: Application of Fundamental Principles. Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre, Indooroopilly, Queensland, Australia: 2000. Disponível em: <<https://www.911metallurgist.com/blog/wp-content/uploads/2015/06/Flotation-Cell-Design.pdf>>. Acesso em: 25 set. 2016.

LIMA, Odair Alves. Suspensão de partículas grossas em células mecânicas de flotação. São Paulo: USP, 2009. Disponível em: < <http://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKEwj--Jj08aHPAhWHjZAKHXh6CNQQFggcMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.teses.usp.br%2Fteses%2Fdisp>>

oniveis%2F3%2F3134%2Ftde-01092009-162645%2Fpublico%2FTese_Revisada_Odair_Alves_Lima.pdf&usg=AFQjCNHGkwNLCYbJ49pEtgHPQHvI3jcWhQ>. Acesso em: 13 set. 2016.

LOTTERMANN, Mateus Rodrigues. Estudos de concentração de um minério de ferro itabirítico compacto de baixo teor por flotação em coluna. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 24, 2012: UFRGS, Porto Alegre, RS. Resumo publicado em evento. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/64821>>. Acesso em: 29 mai. 2016.

LUZ, Adão B., SAMPAIO, João A., FRANÇA, Silvia Cristina A. Tratamento de minérios. 5º. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. Disponível em: <<http://www.cetem.gov.br/livros?start=20>>. Acesso em: 15 mai. 2016.

METSO. Manual de Britagem Metso. Edição 6. Sorocaba: Editora Metso Minerals, 2005. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAAww8Al/manual-mineracao>>. Acesso em: 08 ago. 2016.

PERES, Antônio Eduardo Clarck., ARAÚJO, Armando Corrêa. Froth Flotation: relevant facts and the Brazilian case. Série Tecnologia mineral nº 70. Rio de Janeiro: CETEM, 1995. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/239213118/Froth-Flotation-Relevant-Facts-and-the-Brazilian-Case>>. Acesso em: 10 set. 2016.

PINTO, Pedro Henrique Ferreira. Desenvolvimento de rotas para cominuição de itabiritos compactos do quadrilátero ferrífero. São Paulo: Biblioteca digital USP, 2016. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3134/tde-19072016-085459/pt-br.php>>. Acesso em: 22 ago. 2016.

SALES, Cristiano Geraldo. Rotas de beneficiamento para recuperação de minerais portadores de ferro do underflow do espessador de lamas da usina de Brucutu. Belo Horizonte: UFMG, 2012. Disponível em: <<http://www.ppgem.eng.ufmg.br/defesas/1715M.PDF>>. Acesso em: 29 mai. 2016.

SILVA, Ângelo Quintiliano Nunes. Modelagem da relação teor-recuperação da célula de flotação pneumática. Belo Horizonte: UFMG, 2015. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUBD-9WUK2T/dissertacao_mestrado_angelo_quintiliano_nunes_da_silva.pdf?sequence=1>. Acesso em: 20 set. 2016.

SCHUBERT, Heinrich. On the turbulence-controlled microprocesses in flotation machines. 1999. Int. J. Miner. Process. 56 1999 257–276. Disponível em: <<http://booksc.org/book/4600918>>. Acesso em: 25 set. 2016.

SOUZA, Natasha Almeida Fernandes. Análise crítica de rotas de processamento de minérios de ferro itabiríticos. Rio de Janeiro: Escola Politécnica, 2010. Disponível em: <https://www.google.com.br/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjTjpv6enOAhUFS5AKHasDAeIQFggeMAA&url=http%3A%2F%2Fmonografias.poli.ufrj.br%2Fmonografias%2Fmonopoli10003574.pdf&usg=AFQjCNE_pjAzYrmfAv2ICCzagvx7J7OMuA>. Acesso em: 20 ago. 2016.

TAVARES, L. M.M. Apostila Processamento e Recursos Minerais 1. [S.l. s.n.]: 2009.

VALE. Projeto Itabiritos. 2016. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/initiatives/innovation/itabiritos/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 21 abril 2016.

VALE c. Descrição do equipamento de Peneiramento de alta frequência. 2012. In: Concentração de Minérios. Módulo de treinamento. Arquivo Pessoal.

VALADÃO, George Eduardo Sales., ARAÚJO, Armando Corrêa. Introdução ao tratamento de minérios. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

VARELA, James J. Desenvolvimento e aplicação de britadores primários para minério de ferro. Goiânia/GO. In: XXV ENCONTRO NACIONAL DE TRATAMENTO DE MINÉRIOS E METALURGIA EXTRATIVA & VIII MEETING OF THE SOUTHERN HEMISPHERE, 2013. Goiânia. Disponível em: <<http://search.mme.yang.art.br/download/2013/cominui%C3%A7%C3%A3o-comminution/2346%20-%20VARELA,%20J.J.-%20DESENVOLVIMENTO%20E%20APLICA%C3%87%C3%83O%20DE%20BRITADORES%20PRI-M%C3%81RIOS%20PARA%20MIN%C3%89RIO%20DE%20FERRO.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2016.

VIEIRA, Ana Maria. Efeito da Granulometria na Flotação de Quartzo. Ouro Preto: UFMG. 2005. Dissertação de mestrado. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/MAPO-7REHET/ana_maria_vieira.pdf?sequence=1>. Acesso em: 15 set. 2016

VIEIRA, Marta. Terceira onda permite que minério com baixo teor de ferro seja enriquecido, 06 jul. 2010. Estado de Minas. In: Uai Economia. Disponível em: <http://www.uai.com.br/htmls/app/noticia173/2010/07/06/noticia_economia,i=167400/TERCEIRA+ONDA+PERMITE+QUE+MINERIO+COM+BAIXO+TEOR+DE+FERRO+SEJA+ENRIQUECIDO.shtml>. Acesso em: 21 abr. 2016.

WELLENKAMP, Franz Josef. Moagem Fina e Ultrafina de Minerais Industriais: Uma Revisão. Série Tecnologia Mineral. nº 75. Rio de Janeiro: CETEM, 1999. Disponível em: <http://minhateca.com.br/SauloGontijo/Minera*c3*a7*c3*a3o/Livros/Livro+-+MOAGEM,575628066.pdf> . Acesso em: 10 set. 2016.

WILLS, Barry A. Mineral Processing Technology: An Introduction to The Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. Edição 7. Great Britain: 2006. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/book/9780750644501>>. Acesso em: 30 ago. 2016.