

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM
ENGENHARIA DE RECURSOS MINERAIS - CEERMIN**

MONOGRAFIA

**Principais Etapas do Tratamento de Minérios
Itabiríticos do Quadrilátero Ferrífero**

Aluno: Diego Henrique Oliveira Ferreira

Orientador: Luiz Cláudio Monteiro Montenegro

Junho / 2011

Diego Henrique Oliveira Ferreira

**Principais Etapas do Tratamento de Minérios
Itabiríticos do Quadrilátero Ferrífero**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Minerais.

Professor orientador: Luiz Cláudio Monteiro Montenegro.

Junho / 2011

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos e amados pais Mary e Osvaldo.

À minha querida e amada irmã Mayara.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Universidade por proporcionar-me condições adequadas para realização deste trabalho.

Ao meu orientador, professor Luiz Cláudio Monteiro Montenegro, pela dedicação, entusiasmo, esclarecimentos e idéias relevantes.

Aos demais professores do curso de especialização pelo comprometimento, generosidade e oportunidade de aprender.

Aos meus familiares e amigos sempre presentes em minha vida.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	7
2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA	8
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3.1. Geologia	9
3.1.1. Geologia do Minério de Ferro	9
3.2. Mineralogia.....	11
3.2.1. Mineralogia do Minério de Ferro	11
3.2.2. Minerais de Ganga	14
3.3. Tratamento de Minério de Ferro	16
3.3.1. Fragmentação	16
3.3.1.1. Britagem	19
3.3.1.2. Moagem	22
3.3.2. Granulometria - Separação por Tamanho	24
3.3.2.1. Peneiramento Industrial	25
3.3.2.2. Classificação em Meio Fluido	27
3.3.3. Concentração	28
3.3.3.1. Separação Magnética	29
3.3.3.2. Concentração Gravítica	31
3.3.3.3. Flotação	33
3.3.4. Separação Sólido - Líquido	36
3.3.4.1. Espessamento	36
3.3.4.2. Filtragem.....	38
3.3.5. Principais Equipamentos Utilizados.....	40
4. CONCLUSÕES.....	43
5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	44
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero.....	10
Figura 2 Esquema de fratura por compressão..	17
Figura 3 Esquema de fratura por impacto.....	17
Figura 4 Esquema de fratura por cisalhamento.....	18
Figura 5 Estágio de fragmentação.	18
Figura 6 Estágio de separação por tamanho.....	24
Figura 7 Estágio de concentração	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Fluxograma dos principais equipamentos utilizados41

Tabela 2 Descrição dos principais equipamentos utilizados42

RESUMO

A indústria de mineração de ferro tem a exigência de fornecer concentrados dentro das especificações da indústria metalúrgica. Entretanto as principais jazidas de minérios de ferro existentes no Quadrilátero Ferrífero mostram uma presença cada vez maior de itabiritos. Assim existe uma tendência em beneficiar minerais de ferro com liberação em faixas granulométricas cada vez mais finas e com menor teor de ferro total. Portanto a indústria mineral deve adequar as principais técnicas, metodologias e equipamentos empregados hoje para atender a este novo desafio encontrado nas jazidas de minérios de ferro.

O presente trabalho tem como objetivo uma breve revisão das principais etapas do tratamento de minérios de ferro.

As descrições das etapas de britagem, moagem, classificação, concentração e separação sólido-líquido utilizadas no beneficiamento de minérios finos de ferro foram feitas a partir de citações e referências encontradas na literatura.

A utilização e seleção correta dos equipamentos propicia ao setor um maior aproveitamento dos itabiritos.

ABSTRACT

The iron mining industry has the requirement to provide concentrates within the specifications of the metallurgical industry. However the major deposits of iron ore existing in Quadrilátero Ferrífero show an increased presence of itabirites. So there is a tendency to treat ores with a liberation degree only achievable in a very fine particle size and also with low iron content. The mining industry must adapt its main techniques, methods and equipment applied nowadays to attain this new challenge in the iron ore deposits.

This paper aims to briefly review the main stages of iron ores processing.

The descriptions of the stages of crushing, grinding, classification, concentration and solid-liquid separation applied in the beneficiation of fine iron ore were made from the citations and references found in the literature.

The correct selection and use of equipment makes possible for the mining industry an adequate itabirite beneficiation.

1. INTRODUÇÃO

A indústria de mineração de ferro tem por compromisso fornecer concentrados dentro das especificações da indústria metalúrgica. No entanto, as principais jazidas de minérios de ferro existentes no Quadrilátero Ferrífero mostram uma presença cada vez maior de itabiritos. Assim existe uma tendência em beneficiar minerais de ferro com liberação em faixas granulométricas cada vez mais finas e com menor teor de ferro total. As novas jazidas de minérios de ferro demandam equipamentos com maior capacidade de processamento e que sejam capazes de processar minérios cada vez mais finos.

Portanto o objetivo do presente trabalho é fornecer aos profissionais do setor uma breve revisão das principais etapas do tratamento de minérios de ferro. Embora o trabalho contemple os principais equipamentos, um destaque especial será dado aos equipamentos mais adequados para o beneficiamento de minérios de ferro de baixo teor e com liberação em faixas granulométricas mais finas.

2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA

O presente trabalho tem como objetivo mostrar as principais etapas do tratamento de minérios de ferro.

A permanência da indústria mineral no Quadrilátero Ferrífero está intimamente ligada a sua capacidade de processar minérios itabiríticos. Assim um destaque especial será dado aos equipamentos mais adequados para o beneficiamento de minérios de ferro de baixo teor e com liberação em faixas granulométricas mais finas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Geologia

Neste capítulo é feita uma abordagem breve, da geologia dos minérios de ferro.

3.1.1. Geologia do Minério de Ferro

Os minérios de ferro ocorrem em formações geológicas denominadas formações ferríferas. Estudos de James (1954) e Gross (1965) definem formações ferríferas (IF, *Iron Formation*) como uma rocha sedimentar, com origens químicas, acomodadas ou laminadas, possuindo minerais de ferro, sem ou com intercalações de quartzo ou carbonato.

As formações ferríferas bandadas, conhecidas também como BIFs (*Banded Iron Formation*), são denominadas por James (1954) como rochas bandadas ou laminadas, com camadas submilimétricas, centimétricas ou métricas, que constituem intercalações de camadas compostas de minerais de ferro, principalmente óxidos (hematita, magnetita) e de chert (quartzo) e/ou carbonatos e/ou silicatos de origem sedimentar, diagenética ou seus equivalentes metamórficos.

O metamorfismo é um processo que pode gerar o enriquecimento das BIFs, por metassomatismo. O metassomatismo é proveniente das soluções hidrotermais que trocam o chert (quartzo) por óxidos de ferro (hematita, magnetita), formando uma rocha compacta muito rica em ferro. Os minérios de origem metassomática são majoritariamente constituídos por hematita de granulação da ordem de 20 μ m. O grau de metamorfismo pode ser estabelecido a partir da presença de minerais (cloritas, micas, anfibólios, apatita, sericita, biotita, abeta) e também pelos tamanhos de grãos de quartzos, Vianna (1993).

As formações ferríferas bandadas que ocorrem no Quadrilátero Ferrífero são ilustradas pela coluna estratigráfica mostrada na figura 1.

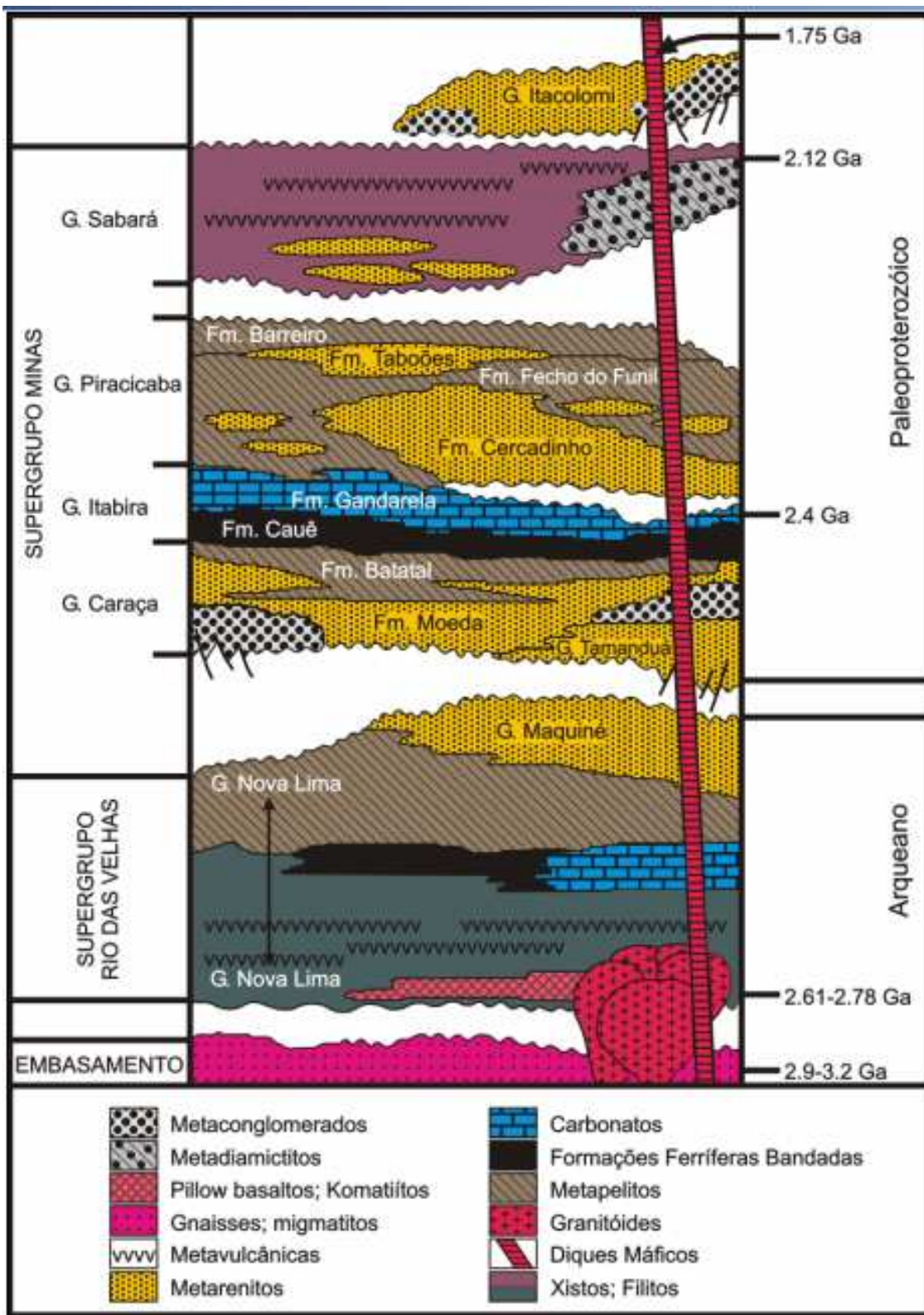


Figura 1 Coluna estratigráfica do Quadrilátero Ferrífero. Alkmim e Marshak (1998).

3.2. Mineralogia

3.2.1. Mineralogia do Minério de Ferro

Hematita

Mineral de ferro de maior significância para a cadeia minero-metalúrgica, cristaliza-se no sistema hexagonal. A hematita tem o hábito de apresentar estrutura, lamelar, especular, terrosa, de cristais tabular ou granular, entre espessos e delgados, placas agrupadas em forma de roseta, configuração botrioidal e reniforme, grãos equiaxiais, pseudomorfa segundo magnetita (variedade martita).

Os cristais possuem um brilho metálico azul do aço, é conhecido por hematita especular e hematita lamelar, já hematita terrosa apresenta brilho opaco, as texturas podem variar de compacta a porosa.

Em termos químicos a hematita é reconhecida como Fe_2O_3 puro, com 69,94% de ferro e 30,06% de oxigênio. Apresenta dureza 5,5 a 6,5. Densidade $5,26\text{g/cm}^3$, Santos (2002), Fontenelle (1994) e Dana (1984).

Magnetita

Mineral de ferro, com estrutura atômica da espinéla (óxido duplo) caracterizado pela presença de quantidades menores de manganês, magnésio, zinco, alumínio, cromo e titânio. Mineral fortemente magnético, brilho submetálico, cor preta com tons variados de marrom ou cinza, azul do aço em partes intemperizadas, é opaca em lâmina delgada. Aparece cinzenta ou apresenta tons creme a rosados, e tem refletividade moderada quando analisado por microscopia de luz refletida. Apresenta granulação média, comumente muito mais grossa que o quartzo, hematita e silicatos de ferro, presentes no mineral. Cristaliza-se no sistema isométrico, classe hexaocáédrica. Ocorre como cristais de hábito octaédrico, em camadas que se alteram com camadas silicosas nas formações ferríferas.

A oxidação (pela adição de O_2) a baixa temperatura, frequentemente relacionada à lixiviação (enriquecimento supergênico) ou movimento do lençol d'água, usualmente converte o cristal de magnetita a grãos de hematita, conservando a morfologia octaédrica da magnetita. Essa forma de hematita é denominada martita (hematita porosa), possuindo características de lamelas de hematita entrelaçadas (estrutura em treliça), que é, portanto, pseudomorfa da magnetita. A martitização é um processo muito comum de formação de minério e é usualmente associada à disseminação das formações ferríferas bandadas, na produção dos minérios hematíticos e/ou hematita martítica (α - Fe_2O_3).

Em termos químicos a magnetita é reconhecida como Fe_3O_4 puro, com 72,4% de ferro e 27,6% de oxigênio. Apresenta dureza 6,0. Densidade $5,2g/cm^3$, Santos (2009), Souza (2005), Santos (2002), Fontenelle (1994), Vianna (1993) e Dana (1984).

Maghemita

É um mineral de ferro resultante da alteração durante o enriquecimento metassomático ou supergênico da magnetita.

Cristaliza-se no sistema cúbico. Estrutura atômica da espinéla com deficiência de ferro. Ocorre na forma de massas amarronzadas, podendo ser também preta-azulada. Quando observada ao microscópio de luz refletida, apresenta uma cor branca a azul acinzentado, com refletividade moderada. Inverte-se para hematita por aquecimento, a uma temperatura de $200^\circ C$ a $700^\circ C$.

Em termos químicos o produto final referente à oxidação (pela perda de Fe^{2+}) da magnetita (Fe_2O_3) é a maghemita, reconhecida como $Fe_{8/3}O_4$ ou γFe_2O_3 . Apresenta dureza 5,0. Densidade $4,4g/cm^3$, Santos (2002)

Goethita

Mineral de ferro mais comum nas jazidas, se forma de modo típico, sob condições de oxidação, como produto do intemperismo. Forma-se também por precipitação direta inorgânica ou biogênica, a partir de águas meteóricas e marinhas.

Cristaliza-se no sistema ortorrômbico, com cristais aciculares, reniformes, maciços, estalactíticos e na forma de agregado fibrosos radiais, laminada. Possui brilho adamantino a opaco, podendo ser sedoso em algumas variedades finas, escamosas ou fibrosas. A cor varia de castanho amarelado a castanho escuro, traço castanho amarelado. Detectável por difração de raios-X.

As cavidades dos minérios de ferro são frequentemente preenchidas com uma fina camada de goethita, que apresenta bandejamento coliforme ou mamilar. Essas camadas sugerem deposição coloidal (tipo gel) e essa estrutura é conhecida como goethita metacoloidal. A origem coloidal da maior parte da goethita presente nos minérios de ferro é responsável por importantes relacionamentos geoquímicos. Podendo conter quantidades significativas de manganês acima de 5,0%.

Em termos químicos a goethita é reconhecida como FeO.OH puro, com 62,9% de ferro, 27,0% de oxigênio e 10,1% de água. O manganês pode estar presente em quantidades acima de 5,0%. Apresenta dureza 5,0 a 5,5. Densidade $4,4\text{g/cm}^3$ e até $3,3\text{g/cm}^3$ quando impura, Santos (2009), Souza (2005), Santos (2002), Fontenelle (1994), Vianna (1993) e Dana (1984).

Goethita-Terrosa ou Limonita

As principais referências tratam a Goethita-Terrosa e a Limonita (usado como termo de campo) como sendo de caracteres igual, de mesma estrutura, idênticas entre si. É formada em grãos altamente intemperizados, sendo produto da alteração de óxidos, sulfetos e silicatos de ferro. Ocorre como minério de ferro, em formas maciças, como crosta, como preenchimento de cavidades estalactíticas e como capeamento de rochas, sendo um anfibólio.

Podem ser consideradas como hidróxidos de ferro hidratados, de aspecto terroso, de granulação extremamente fina, de baixa cristalinidade ou amorfos, de cor amarela, castanha, castanha alaranjada a negra amarronzada, ocasionalmente tem aspecto vítreo. Difícil detecção por difração de raios-X

Em luz transmitida (microscópio ótico), é amarela, com tonalidades de marrom a vermelha, sendo amarronzada em luz refletida, podendo-se apresentar também com cor cinza.

Em termos químicos a goethita-terrosa ou limonita é reconhecida como $\text{FeO.OH.nH}_2\text{O}$. Apresenta dureza 5,0 a 5,5. Densidade $3,6\text{g/cm}^3$ a $4,0\text{g/cm}^3$, Souza (2005), Santos (2002), Fontenelle (1994) e Vianna (1993).

3.2.2 Minerais de Ganga

Quartzo

Mineral de ganga mais comum dos minérios de ferro. É um componente importante nas rochas ígneas e metamórficas. A desintegração das rochas ígneas que o contem, produz grãos de quartzo, que ao se acumularem, formam a rocha denominada arenito.

Está presente na forma de cristais prismáticos, com romboedros em suas pontas, dando um efeito de bipirâmide hexagonal. Pode apresentar fratura conchoidal. Brilho vítreo, em algumas espécies gordurosas. Geralmente é transparente ou branco mas frequentemente é colorido por impurezas, apresentando diferentes variedades. Possui uma extrema resistência ao ataque químico e físico.

Durante a análises químicas podem apresentar pequenas quantidades de outros óxidos, que são geralmente devidos a pequenas inclusões de outros minerais ou a líquido que preenchem cavidades no seu interior. Entre todos os minerais, o quartzo é um composto químico de pureza quase completa e freqüentemente possui propriedades físicas constantes.

Em termos químicos o quartzo é reconhecido como SiO_2 puro, com 46,7% de silício e 53,3% de oxigênio. Apresenta dureza 7,0. Densidade $2,65\text{g/cm}^3$, Souza (2005), Santos (2002), Vianna (1993) e Dana (1984).

Caulinita

Mineral argiloso. Forma-se principalmente por processos de alteração hidrotermal ou meteorização (intemperismo) de silicatos de alumínio. Muitas vezes podem estar associados ao quartzo, óxidos de ferro, pirita, siderita, moscovita e outros minerais argilosos.

Cristaliza-se no sistema triclínico. Comumente tem brilho terroso, podendo suas placas de cristal apresentar brilho nacarado. Sua cor é branca, muitas vezes colorida variadamente pelas impurezas. Ocorre usualmente como massas argilosas, compactas ou friáveis.

Em termos químicos a caulinita é reconhecida como $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ puro, com 39,5% de alumina, 46,5% de sílica e 14,0% de água. Apresenta dureza 2,0 e densidade $2,6\text{g/cm}^3$, Souza (2005), Santos (2002), Vianna (1993) e Dana (1984).

Gibbsita

Importante portador de alumínio. Ocorre através de processo supergênico (precipitado coloidal), usualmente forma-se sob condições climáticas subtropicais a tropicais, por intemperismo prolongado e lixiviação da sílica de rochas portadoras de alumínio. Resulta da dessilicificação de argilas.

Cristaliza-se no sistema monoclínico, classe prismática. Seu brilho é usualmente vítreo, as placas de cristal são de brilho nacarado. Possui coloração incolor e branca em diversos tons. Transparente a translúcido. Insolúvel, assume a cor azul quando é umedecida com nitrato de cobalto e posteriormente aquecida (alumínio).

Em termos químicos a gibbsita é reconhecida como $\text{Al}(\text{OH})_3$ puro, com 65,43% de alumina e 34,47% de água. Apresenta dureza de 2,5 a 3,0. Densidade $2,3\text{g/cm}^3$ a $2,4\text{g/cm}^3$, Souza (2005), Vianna (1993).

3.3. Tratamento de Minério de Ferro

O termo tratamento de minério de ferro corresponde ao processamento e beneficiamento de rochas portadoras de ferro.

O arranjo deste processo deve ser flexível, podendo ter diversas configurações, sempre respeitando as características físicas e químicas dos minérios.

Os minérios de alto teor são usualmente tratados em etapas de fragmentação, classificação por tamanho, espessamento e filtragem.

Os minérios de baixo teor e com uma granulometria mais grossa devem ser tratados em etapas de britagem, moagem, classificação por tamanho, concentração gravítica e flotação. Já os minérios com uma granulometria natural mais fina utilizam na concentração os separadores magnéticos de alta intensidade a úmido e a flotação catiônica.

3.3.1. Fragmentação

A fragmentação dos blocos pode ser considerada como uma etapa de desmonte de rocha, operação realizada na lavra de mina. A redução posterior do tamanho das partículas pode ser considerada como etapa de tratamento de minérios, sendo aplicada em usinas e testes em bancada. O sistema pode constituir a operação de britagem e moagem.

A fragmentação pode ser exercida através de três diferentes mecanismos envolvendo a energia mecânica. A compressão, o impacto e o cisalhamento são mecanismos determinantes para a tomada de decisão e determinam a aplicação dos equipamentos de britagem e moagem, Araújo (2007) e Kelly e Spottiswood (1982).

A compressão fornece duas superfícies que trabalham em coordenação, com movimentos de mesmo sentido e se caracteriza em comprimir partículas. A energia mecânica, torque do equipamento é aplicado de forma mais lenta, podendo ser gradativamente aumentada ou diminuída. O resultado do trabalho pode demonstrar

fragmentos pequenos, o tamanho das partículas resultantes é próximo ao da partícula original. A figura 2 ilustra a fragmentação por compressão.



Figura 2 Esquema de fratura por compressão. Kelly e Spottiswood (1982).

O impacto fornece uma massa que gera uma força, energia cinética, quando trabalhada esta força aplicada é muito superior à resistência do bloco e da partícula. O resultado deste choque de massa apresenta um grande número de partículas em uma ampla faixa granulométrica. Este método apresenta maior eficiência energética, sua aplicação é mais restrita aos materiais menos abrasivos (substâncias muito duras). A figura 3 ilustra a fragmentação por impacto.



Figura 3 Esquema de fratura por impacto. Kelly e Spottiswood (1982).

O cisalhamento (abrasão) é trabalhado com massas abrasivas, fornece duas superfícies que trabalham com movimentos de sentido contrário. As partículas são colocadas entre as superfícies. A força aplicada deve ser suficiente para provocar a fratura em toda a partícula. O resultado deste trabalho gera pequena diminuição da partícula original e a geração de partículas finas. A figura 4 ilustra a fragmentação por cisalhamento.

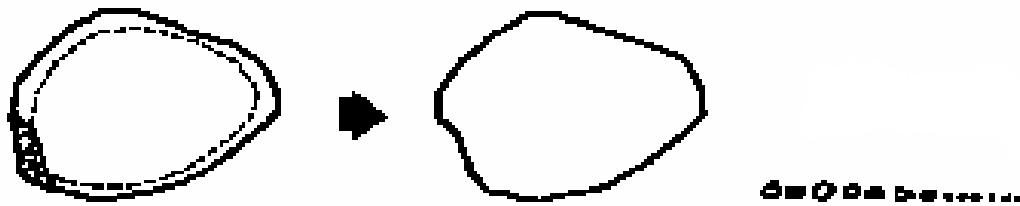


Figura 4 Esquema de fratura por cisalhamento. Kelly e Spottiswood (1982).

Estes mecanismos estão presentes em várias operações e geram distribuição granulométrica característica para cada situação como ilustrado na figura 5.

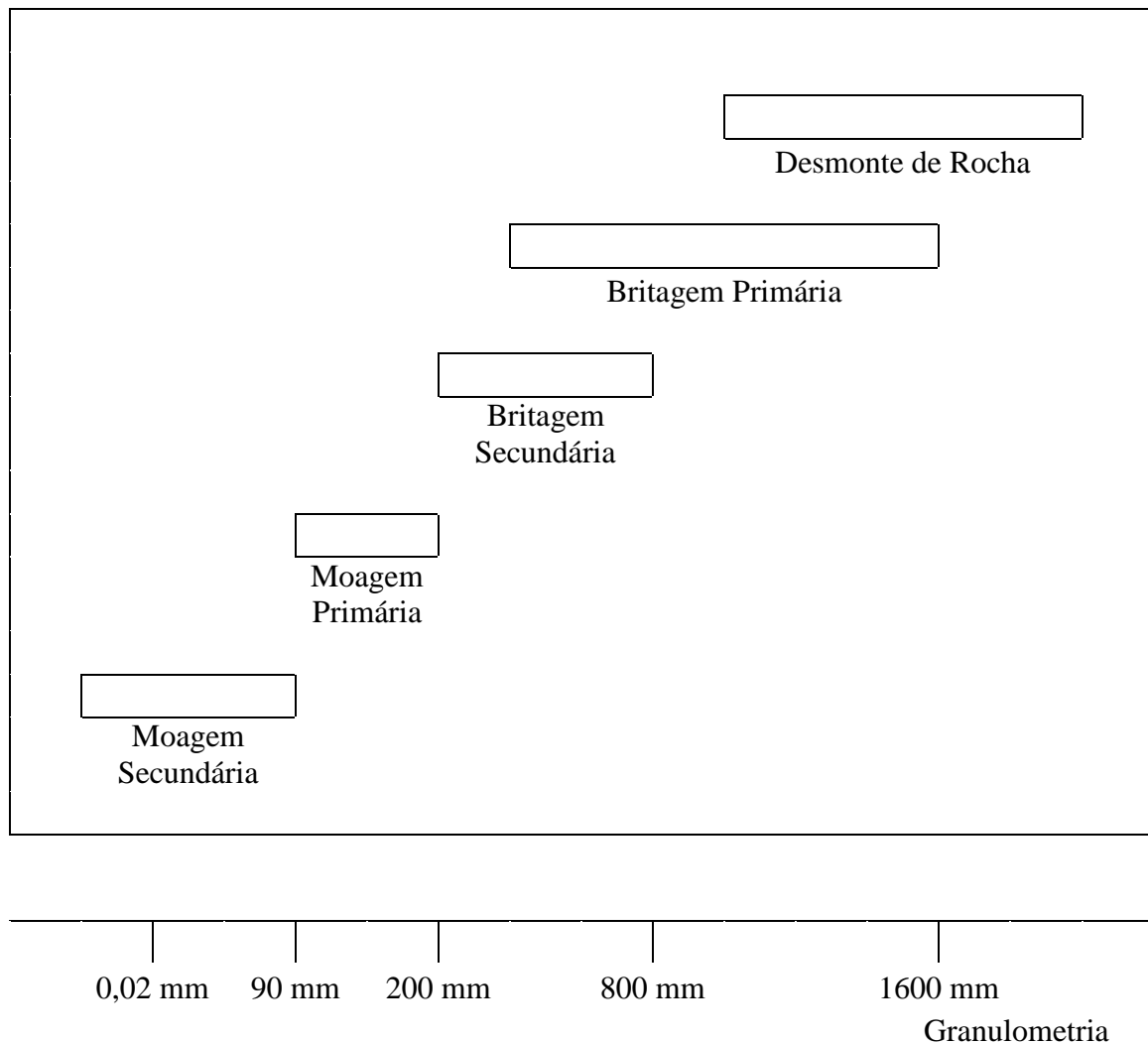


Figura 5 Estágio de fragmentação.

3.3.1.1. Britagem

Os britadores são considerados uma etapa mais que essencial para o tratamento de minérios. Trabalham em uma faixa granulométrica superior de metros ao centímetro. Sua aplicação é dividida em britagem primária e britagem secundária.

A britagem primaria consiste na aplicação de primeiro estágio, recebendo o material proveniente da mina, *run of mine* (ROM). Em alguns momentos especiais o britador primário pode ser remanejado da usina para a mina, caracterizando-se como um britador móvel. Os equipamentos de britagem primária podem ser divididos em britadores de mandíbulas, britadores giratórios e britadores de impacto, Araujo (2007).

Os britadores de mandíbula devem ser constituídos de duas superfícies, sendo uma fixa e outra móvel. O britador convencional trabalha com a alimentação feita a partir de uma abertura de alimentação fixa e uma abertura de saída variável. O material a ser alimentado é fragmentado pela aproximação e pelo afastamento da placa móvel, com uma rotação de aproximadamente 100rpm a 300rpm, potência de 2,25kW a 225kW. Não há restrição à abrasividade da alimentação, tem *top size* alto para lamelas e gera um grau de redução de 5/1. A alimentação nominal é realizada entre 500mm a 1500mm, possui capacidade de produção baixa a média, com valores iguais ou menores que 1.000t/h. O britador pode ser projetado e construído com um ou dois eixo.

Os britadores de um eixo sofrem uma solicitação mecânica maior e apresentam maior desgaste das placas e geram mais finos. Entretanto sua capacidade de alimentação é maior e assim pode ser empregado no beneficiamento de material pobre.

Os britadores giratórios devem ser constituídos de duas superfícies, uma interna e outra externa. A superfície interna possui um vértice para cima, trabalha em um movimento circular, aproximando e afastando da superfície fixa, com rotação de 85rpm a 150rpm. A superfície externa é formada por um tronco de cone fixo com vértice para baixo.

Sua capacidade de produção é aproximadamente média a alta com valores iguais ou maiores que 1.000t/h. Sua potência é de 5kW a 750kW, não possui restrição ao material a ser alimentado e gera uma redução de 8/1. A alimentação nominal é realizada entre

1000mm a 1600mm. Trabalha durante todo o ciclo de fragmentação, podendo receber a alimentação direta de caminhões, dispensando o uso de alimentadores.

Os britadores de impacto *Barmac* são constituídos de um conjunto de peças que fazem com que uma parte do material se choque com o material alimentado, de forma a jogar as partículas de encontro a uma placa fixa, localizada dentro de uma câmara.

A energia mecânica preponderante, via impacto, é produzida por um rotor que gira a uma rotação de 500rpm a 3.000rpm, com potência de 11kW a 450kW. Caracteriza por alta produção de finos e alto grau de redução, 40/1. A alimentação nominal é realizada entre 200mm a 800mm, possui capacidade de produção baixa, menor que 1.000t/h. A abrasividade da alimentação deve ser tal que a soma de sílica mais óxidos metálicos seja menor que 15%.

É bom ressaltar que os britadores de impacto apresentam restrições quanto à utilização de materiais abrasivos, devido ao nível de desgaste dos martelos.

A britagem secundária apresenta parâmetros granulométricos de alimentação inferiores à 15cm, a operação pode ser realizada a seco, desta forma o equipamento é caracterizado como sendo mais leve, Araujo (2007).

A britagem secundária pode trabalhar com, britadores de impacto e/ou britadores cônicos. Os britadores de impacto têm a mesma função, trabalham de forma semelhante aos primários e também apresentam alto grau de redução, 40/1.

Já os britadores cônicos apresentam semelhança aos britadores giratórios. Normalmente são mais utilizados na britagem secundária devido à granulometria de alimentação ser mais fina, entre 200mm a 500mm, possui capacidade de produção alta, maior que 1.000t/h. Possui a superfície de fragmentação com ângulo menor de inclinação. Trabalham gerando um grau de liberação em torno de 3/1 a 7/1.

A cominuição é a operação ou o conjunto de operações que envolvem a britagem e moagem. As etapas relatadas anteriormente, só serão realizadas, mediante a atuação da energia mecânica.

A energia exercida no processo tem por objetivo fraturar o material de interesse. Bond (1952) ressaltou a energia aplicada e o tamanho das partículas obtidas. Sabia ele que o trabalho aplicado é proporcional ao comprimento das fissuras iniciais que se desenvolvem no fraturamento. A teoria de Bond é aplicada, com fatores de correção, para o dimensionamento dos moinhos de barras e bolas. A energia consumida na redução do tamanho das partículas é proporcional à área da nova superfície produzida e pode ser representada da seguinte forma.

$$E = 10W_i \left[\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right]$$

assim:

E = energia aplicada (kWh/tonelada curta).

W_i = energia necessária à fragmentação desde um tamanho infinito até 80% passante em 100 μ m (kWh/tonelada curta).

F = abertura em malha quadrada que deixa passar 80% da alimentação (μ m).

P = abertura em malha quadrada que deixa passar 80% do produto (μ m).

O grau de redução do material é calculado de acordo com a seguinte expressão.

$$GR = \frac{F_{80}}{P_{80}}$$

assim:

GR = grau de redução

F_{80} = abertura que deixa passar respectivamente 80% da alimentação.

P_{80} = abertura que deixa passar respectivamente 80% do produto.

3.3.1.2. Moagem

A moagem trabalha com grau de liberação na faixa do centímetro ao micrômetro. Os moinhos são construídos em forma de cilindros rotativos. O trabalho de fragmentação dos materiais é realizado a partir de adição dos corpos moedores ou mesmo do material a ser moído.

Os moinhos de bolas tem como carga moedora mais frequente as bolas de aço ou ferro fundido. Os moinhos podem também trabalhar com corpos de geometrias cônicas (*cylpebs*). Estes tipos de moinhos com *cylpebs* são utilizados na moagem fina. Geneticamente a configuração de construção um moinho pode ser com descarga por *overflow* ou por diagrama.

A descarga por *overflow* pode proporcionar a passagem da carga moedora. Para evitar este fato é necessário colocar alguns dispositivos de bloqueio. A sua alimentação caracteriza-se por receber materiais menores que 15mm e deve trabalhar com volume de carga entre 35% a 45%.

A descarga por diagrama é usada em alimentações mais grosseiras ou para minimização da produção de finos. Por isto possui maior quantidade de corpos moedores em seu interior, Araujo (2007) e Montenegro (2010).

Os moinhos podem exercer também a moagem semi-autógena e autógena. Os moinhos semi-autógenos e autógenos são especialmente indicados para o trabalho com material que apresente dificuldade na britagem ou no peneiramento a úmido. A fragmentação ocorre pela ação do próprio minério, moagem autógena. A moagem semi-autógena fragmenta o minério com ajuda de cargas moedoras de forma a processar as partículas finas. Os moinhos utilizam uma grelha de aço ou borracha para segurar os corpos moedores e as partículas maiores. As partículas menores vão para baixo, como material passante.

A moagem autógena é a cominuição de material num moinho rotativo, posicionado horizontalmente. O sistema utiliza o próprio minério como corpos moedores, mecanismo para uma possível aplicação em minério de ferro.

A moagem autógena e semi-autógena é usada quase que em sua totalidade para minérios sulfetados. Seria muito interessante verificar a aplicabilidade deste tipo de moagem para os minérios de ferro brasileiros. Como este tipo de moagem tem custo operacional alegadamente mais baixo do que a moagem de bolas e os moinhos autógenos e semi-autógenos têm capacidades elevadas, essa opção de uso poderia ser de grande valia para as mineradoras.

Os moinhos autógenos normalmente são aplicados em primeiro estágio, moagem primária. Um importante aspecto a comparar entre os moinhos autógenos e os outros é o consumo energético, pouco superior em comparação aos moinhos convencionais. Os moinhos autógenos são aplicáveis a minérios que produzem blocos competentes, que não degradam facilmente. Podem utilizar grandes pedaços de rocha como corpos moedores ou ainda utilizar rochas de tamanhos intermediários. O equipamento trabalha com alimentação nominal de 200mm e capacidade de 3.500t/h, Beraldo (1987), Gupta e Yan (2006).

A moagem semi-autógena (*semi-autogenous grinding - SAG*) consiste na cominuição de material num moinho rotativo que utiliza o material de alimentação, acrescido de um meio suplementar de moagem. Normalmente são utilizadas bolas de aço em até 10% do volume nominal. Os moinhos semi-autógenos têm aplicação semelhante às dos moinhos autógenos. Os moinhos semi-autógenos são preferidos por possuir menor sensibilidade ante as variações das características dos minérios. Este moinho gera menor consumo energético em relação aos moinhos convencionais. O equipamento trabalha com alimentação nominal de 200mm e capacidade de 5.000t/h, Beraldo (1987), Gupta e Yan (2006).

Os moinhos de Rolo de Alta Pressão (*High Pressure Grinding Rolls- HPGR*) trabalham gerando a compressão das partículas dos minérios, envolvendo as partículas individuais, apertado-as entre superfícies convergentes de rolos. O mecanismo é responsável pela redução de tamanho das partículas através da compressão. É capaz de causar a quebra do minério através da pressão exercida pelos rolos de até 300MPa. A alimentação deve ser menor que 90mm e capacidade de 10t/h a 2.000t/h. Normalmente considera-se que o tamanho máximo de partículas que seria fisicamente comprimido pelos rolos seja aproximadamente 1,75 vezes o tamanho da abertura de operação, Gupta e Yan (2006).

Já o equipamento *Vertimill*, que trabalha verticalmente é capaz de processar minérios finos, recebendo alimentação de até 6,0mm e moer produtos menores do que 0,02mm. O moinho possui dimensões padronizadas cuja potência varia de 15HP (11kW) a 3000 HP (2240 kW). Seu funcionamento consiste de uma hélice de rosca dupla, suspensa, que agita os corpos moedores. Na parte externa, uma bomba de reciclagem predetermina a aceleração ascendente que provoca a classificação das partículas finas na parte superior do corpo do moinho. Essa pré-classificação e a remoção do material de determinada granulometria na alimentação reduzem a remoagem e aumenta a eficiência da operação, Metso (2011).

Os moinhos podem ter aplicação durante a moagem secundária e terciária, proporcionando um aumento no grau de liberação das partículas finas ou adequação do tamanho às necessidades do processo subsequente.

3.3.2. Granulometria - Separação por Tamanho

Os equipamentos de separação por tamanho são aqueles que possibilitam separar o minério em diferentes faixas granulométricas como ilustrado na figura 6.

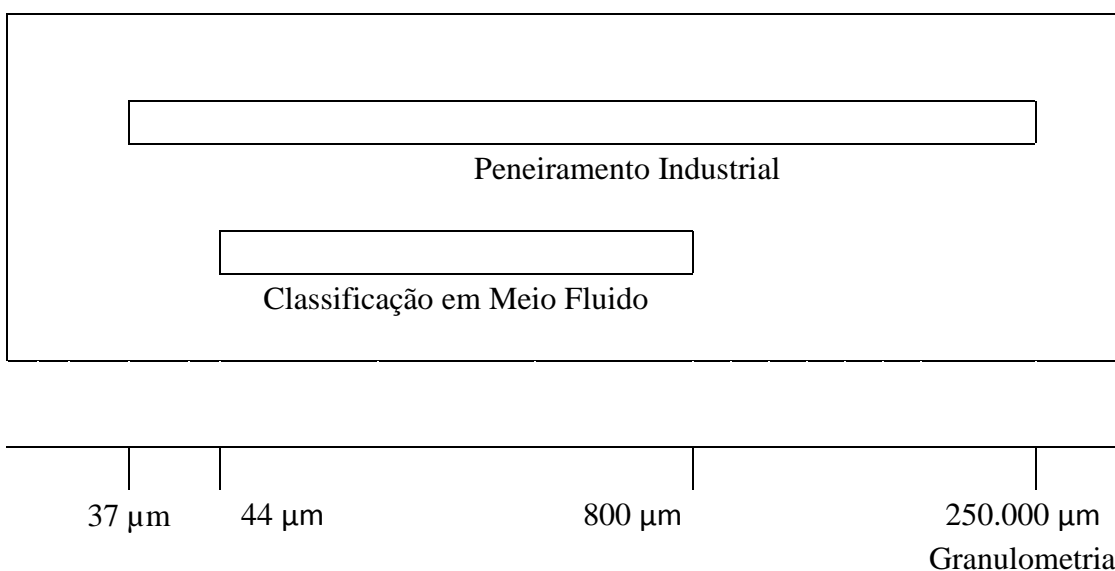


Figura 6 Estágio de separação por tamanho.

3.3.2.1. Peneiramento Industrial

O peneiramento industrial tem como desafio trabalhar com grande capacidade de processamento e ao mesmo tempo com partículas cada vez mais finas.

Os equipamentos de peneiramento são aplicados com faixas de tamanho entre $37\mu\text{m}$ até cerca de $250.000\mu\text{m}$, podendo trabalhar a seco ou a úmido. Quando o peneiramento é feito via úmido, trabalha em geral com partículas finas ou que aglomeram facilmente a frio. O peneiramento consiste essencialmente em processar o material, gerando dois produtos: o *undersize* (material passante) e o *oversize* (material retido). As peneiras têm como principal função adequar e controlar a granulometria do material. O peneiramento a úmido é empregado com a finalidade de remover partículas finas. São utilizados jatos de água através de bicos instalados em tubos transversais com pressão entre 1atm a 3atm. A superfície das peneiras pode ser construída de aço, borracha e poliuretano, Galery (2007).

As aberturas são identificadas em escala de polegada linear denominada por malha ou *mesh*. A peneira de 35 *mesh* terá 35 aberturas em 1 polegada linear. Na prática emprega-se uma série de aberturas em escala de milímetros e micrômetros. A determinação das faixas de tamanho das partículas, análise granulométrica, é feita por meio de uma série de peneiras. Esta série pode ser definida com a seguinte equação, Brandão (2007).

$$a_n = a_o r^n$$

onde:

a_n = abertura de ordem n.

a_o = abertura de referência ou base de escala ($a_o = 1\text{mm}$).

r = razão da escala (relação constante entre duas aberturas sucessivas ($r = \sqrt{2} = 1,414$)).

Gaudin (1939) definiu a relação de tamanho das partículas através da passagem do material por aberturas de forma geométrica conhecida definindo o material como passante ou não passante.

A eficiência do peneiramento é diretamente relacionada com a qualidade da separação. A eficiência de peneiramento relativa ao material passante é:

$$E_p = \frac{\text{passante real}(t/h)}{\text{passante teórico}(t/h)} \times 100$$

onde:

E_p = eficiência do peneiramento.

A Peneira Vibratória Horizontal realiza a operação de forma a estratificar o material e a transportá-lo. As partículas são movimentadas na superfície da peneira, de forma linear. O material é transportado com uma velocidade de 12m/min a 18m/min. O equipamento trabalha com alimentação nominal de 250 μ m a 100.000 μ m e uma capacidade de 4m³/h/m² a 100m³/h/m², Galery (2007).

A Peneira Vibratória Inclinada produz movimento vibratório com frequência entre 700rpm a 1.000rpm. A frequência varia de acordo com o ângulo de inclinação da superfície da peneira. O grau de inclinação varia de 15° a 35°, podendo ter múltiplas inclinações. As partículas movimentam na superfície de forma circular em uma posição vertical. São transportadas com uma velocidade de 18m/min a 36m/min. A permanência durante o leito é menor. O equipamento trabalha com alimentação nominal de 250 μ m a 100.000 μ m e uma capacidade de 4m³/h/m² a 100m³/h/m², Galery (2007).

As Peneiras de Alta Frequência possuem mecanismo de vibração eletromagnética, trabalham de forma inclinada e são alimentadas no topo do equipamento. São projetadas para fornecer maior eficiência na capacidade de produção. Possuem vibração agressiva aplicada diretamente na peneira, o que gera a maior capacidade e processamento das partículas finas. As peneiras podem ser constituídas de decks simples, duplos ou triplos. São mais recomendadas no tratamento dos minérios finos. O equipamento trabalha em geral com alimentação nominal de 37 μ m a 100 μ m, Galery (2007).

3.3.2.2. Classificação em Meio Fluido

Nesta etapa a alimentação é constituída por faixas granulométricas finas em um meio fluido. Durante o procedimento as partículas são separadas em dois produtos, *underflow* possuindo partículas de maior diâmetro enquanto que as partículas encaminhadas para o *overflow* possuem menor diâmetro.

A alimentação normalmente se realiza com granulometrias muito finas. Em alguns casos especiais o processo é considerado etapa de deslamagem, classificando partículas abaixo de 5 μ m.

Os equipamentos de classificação atuam em faixas granulométricas em que o peneiramento demonstra baixa eficiência. Recebem uma alimentação composta de partículas de diferentes tamanhos. Normalmente os classificadores trabalham com forças centrífugas e gravídicas que propiciam a sedimentação das partículas. Os equipamentos de classificação em meio fluido têm como uma das mais importantes variáveis a porcentagem de sólidos da polpa. Usualmente estas forças, centrífugas e gravídicas, fazem com que as partículas tomem diferentes trajetórias dentro do classificador, Galery (2007).

Os classificadores hidráulicos são limitados. Utilizam a sedimentação por gravidade contra corrente ascendente de água. Pode também ocorrer a sedimentação através da centrifugação. As partículas de maior diâmetro e maior densidade vão sedimentar e serão retiradas pelo *underflow*. As partículas de menor densidade e diâmetro serão transportadas para o *overflow*. O equipamento é alimentado com partículas entre 50 μ m a 500 μ m, Carrisso (2004), Galery (2007) e Montenegro (2010).

Os classificadores mecânicos são representados por um compartimento de sedimentação das partículas mais densas, que são retiradas pelo *underflow*. O espiral tipo parafuso sem fim pode ter hélices tipo passo simples, duplo ou triplo, sendo responsável por transportar as partículas. Partículas menos densas tendem a transbordar no sistema e serem coletadas no *overflow*.

O equipamento trabalha de forma inclinada recebendo a alimentação sob a forma de polpa com granulometria entre 44 μ m a 800 μ m, Carrisso (2004) e Galery (2007).

O Hidrociclone é o equipamento de classificação em meio fluido mais empregado. Podem ser do tipo convencional ou canister. Ambos os tipos utilizam forças de centrifugação e seus sistemas são relativamente semelhantes. Eles são usualmente aplicados em faixa de 2000 μ m a 2 μ m. São constituídos por uma parte cilíndrica e uma cônica.

A polpa é alimentada através do “inlet”. As partículas de maior tamanho são retiradas através do *underflow*, “apex”. As partículas menores são removidas pelo *overflow* “vortex”, Galery (2007) e Montenegro (2010).

3.3.3. Concentração

As operações de concentração normalmente empregadas no tratamento de minérios itabiríticos são associadas aos métodos de separação magnética, concentração gravítica e flotação.

Estes métodos tem aplicações para faixas características de distribuição granulométrica como ilustrado na figura 7.

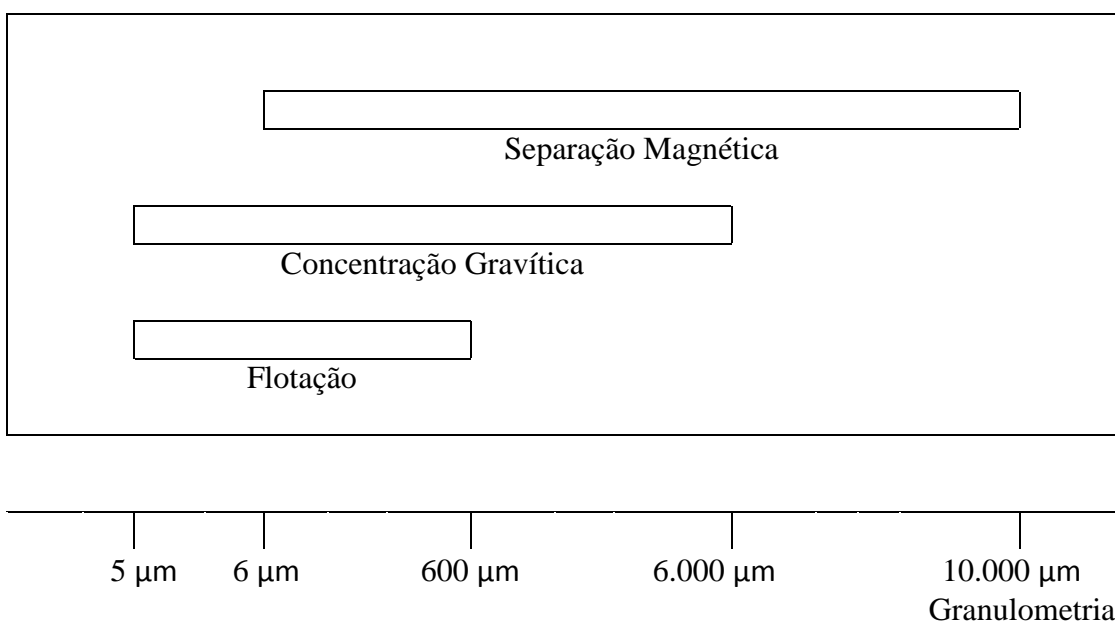


Figura 7 Estágio de concentração.

3.3.3.1. Separação Magnética

Nos equipamentos de separação magnética os minerais diamagnéticos, materiais de baixa susceptibilidade magnética, são repelidos pelo campo magnético. Os paramagnéticos ou ferromagnéticos, são materiais de média a alta susceptibilidade magnética, sendo fortemente atraídos pelo campo magnético dependendo da intensidade do mesmo.

Os equipamentos podem ser selecionados conforme a necessidade do trabalho. Os campos magnéticos podem ser de baixa, média e alta intensidade. Neste caso o magnetismo do mineral é a propriedade diferenciadora do sistema.

A grandeza que relaciona a intensidade de magnetização (M) representa o número de linhas de força passando pela unidade de área do material e o campo magnetizante aplicando (H). Sendo denominada susceptibilidade magnética (K), Araujo (2007) e Papini (2010).

$$K = \frac{M}{H}$$

onde:

K = susceptibilidade magnética.

assume valores positivos para materiais paramagnéticos com valores inferiores a 10^{-3} .

assume valores negativos para materiais diamagnéticos com valores em módulo, $< 10^{-5}$.

M = número de linhas de força passando pela unidade de área.

H = ampere/m = $4\pi \times 10^{-7}$ Tesla.

1 Gauss = 10^{-4} Tesla (T).

O separador magnético de Rolos de Terras Raras é um equipamento mais simples. Trabalha com imãs permanentes em processo a seco ou a úmido. A esteira recebe a alimentação e os rolos magnetizados separaram o mineral útil do não útil. A

alimentação trabalha com partículas de 0,06mm até 10mm quando úmido e 0,2mm até 10mm quando a seco. A capacidade de produção é 2t/h - 12t/h. Trabalha com o campo magnetizado de 12.000 *Gauss* a 16.000 *Gauss*, Araujo (2007) e Papini (2010).

O separador magnético tipo *Jones*, trabalha com campo magnético de alta intensidade, criados por eletroímãs. São recomendados para concentrar minérios de ferro fracamente magnéticos.

O processo normalmente é realizado a úmido. Consiste de dois níveis de placas, que trabalham de forma simultânea em uma estrutura circular com movimento rotatório. As placas que recebem a alimentação sob a ação do campo são ranhuradas e paralelas. O espaço entre as placas ranhuradas deve ser de 1,5 a 2 vezes maior que o tamanho da partícula. Placas de pólos salientes são utilizadas quando se deseja um concentrado de alto teor. Enquanto placas ranhuradas triangulares são responsáveis por gerar alta recuperação da fração magnética.

A polpa é alimentada na matriz que captura as partículas magnéticas, enquanto a fração não-magnética é coletada abaixo da matriz. As partículas paramagnéticas são atraídas para a superfície das placas podendo ser removidas posteriormente por um jato de água com baixa pressão. A alimentação nominal é realizada por partículas de tamanho de 0,01mm a 1,0mm. Sua capacidade é de 10t/h - 180t/h, com campo magnético entre 6.000 *Gauss* a 12.000 *Gauss*, Araujo (2007) e Papini (2010).

O separador magnético *Ferrous Wheels* tem sua principal aplicação na diminuição do nível de minerais de ganga (quartzo e gibbsita) no “*pellet feed fines*”.

O equipamento normalmente trabalha a úmido. Consiste na alimentação feita sobre o pólo magnético superior, que dispõe de *sprays* de água com baixa pressão, responsáveis pela retirada do material não magnético. O material magnético (concentrado) fica retido nas matrizes e com movimento circular do disco, sai da região de influência do campo magnético sendo lavado pelos *sprays* de água com alta pressão. Os pólos magnéticos são construídos com imãs permanentes de alta potência e opera com matrizes de separação, o que propicia a geração de campos magnéticos de alto gradiente. A alimentação é feita com partículas entre 0,01mm a 0,15mm. Sua capacidade é de 1t/h -

40t/h, com campo magnético aplicado entre 2.000 *Gauss* a 2.500 *Gauss*, podendo proporcionar fluxo magnético com alto gradiente, chegando a 12.000 *Gauss*, Araujo (2007) e Papini (2010).

Separador magnético *Slon*, é caracterizado por beneficiar minerais fracamente magnéticos pela atuação do campo magnético do fluido pulsante e da gravidade para separar os minerais.

O sistema trabalha a úmido. Sua alimentação entra no anel do separador vertical através de fendas, na parte superior. A matriz trabalha magnetizada, a polpa é pulsada e partículas magnéticas são atraídas para a matriz. As partículas magnéticas são levadas para fora do campo e descarregadas. As não-magnéticas passam através da matriz e são descarregadas através das fendas por baixo, por gravidade ou arraste. A alimentação é feita com partículas entre 0,006mm a 1,0mm. Sua capacidade é de 4t/h - 80t/h, com campo magnético aplicado entre 2.000 *Gauss* a 2.500 *Gauss*, podendo proporcionar fluxo magnético com alto gradiente, chegando a 12.000 *Gauss*. Araujo (2007) e Papini (2010).

3.3.3.2. Concentração Gravítica

A concentração gravítica consiste em utilizar a diferença das densidades dos minerais presentes para promover a separação. A concentração é favorecida pela força gravitacional, empuxo, resistência.

Os Jigues realizam o trabalho através da passagem de correntes verticais com movimentos de pulsação em um leito de partículas. Na maioria dos casos o mecanismo de pulsação é realizado com o emprego de água ou ar comprimido através do mecanismo de pistão ou por diafragma. As partículas maiores e mais densas tendem a passar pelo leito de esferas por sobre o crivo (superfície perfurada) e seguem para o fundo do equipamento, enquanto as menores e menos densas tendem a seguir pelo “*overflow*”.

O equipamento é alimentado com granulometrias na faixa de 150 μ m a 12000 μ m. A capacidade nominal máxima de produção é de 20t/h, Araujo (2007) e Papini (2010).

A Mesa concentradora, normalmente utilizada em laboratório para testes preliminares de concentração, possui superfície inclinada sendo formada de pequenas saliências (rifles) posicionadas paralelamente ao longo do comprimento da mesa. O trabalho é realizado através de movimentos assimétricos na direção longitudinal. O fluxo das partículas é proporcionado pela adição de água ao sistema. As partículas menos densas tendem a movimentar longitudinalmente do que as mais densas. Assim as mais densas tendem a movimentar lateralmente.

A alimentação pode ser em faixas granulométricas entre 60 μ m a 550 μ m, com capacidade de alimentação entre 0,5t/h a 2t/h, Araujo (2007).

Os concentradores espirais tem formato helicoidal com seção semicircular. As espirais são suportadas por uma coluna central. O concentrado é coletado em pontos de coleta ao longo da calha e direcionado para dentro da coluna central, o rejeito segue o fluxo até o final da calha. A separação das partículas se dá pelas forças gravitacional, centrífuga de arraste e de atrito.

A alimentação pode ser em faixas granulométricas entre 75 μ m a 1000 μ m, com capacidade de alimentação entre 1t/h a 3t/h por espiral, Araujo (2007) e Papini (2010).

O concentrador *Falcon* é normalmente usado em aplicações de concentração gravítica que exigem uma maior produção. As aplicações incluem a concentração de minério de ferro, estanho, tântalo, tungstênio, cromo, cobalto, carvão oxidado multa e muitos outros minerais. Muitas vezes, o concentrador centrífugo *Falcon* é utilizado para recuperar as partículas minerais valiosas que são muito finas para serem recuperadas por separação em meio denso, espirais, ou qualquer outro processo que utiliza a gravidade.

Projetado para operação contínua, estas máquinas são capazes de produzir rendimentos de massa tão alta quanto 40%. A principal utilização do *Falcon* é na pré-concentração onde se deseja maximizar a recuperação e diminuir a tonelagem de minério processada nas etapas subsequentes. Os concentrados são deslamados e têm alta % de sólidos (tipicamente, 70% de sólidos em massa) o que facilita o processamento subsequente quando necessário.

A alimentação trabalha com granulometria entre $5\mu\text{m}$ a $6000\mu\text{m}$ e capacidade de 100t/h. A alimentação é continuamente introduzida no fundo do cone de rotação. A polpa é então ejetada na direção da parede da cesta por meio de um rotor. Durante o movimento as partículas leves se soltam e voltam para polpa enquanto as partículas densas ficam retidas na parede interna do cone, até serem descarregadas, Papini (2010).

O Ciclone de meio denso é um equipamento que possibilita a separação de partículas muito finas. Trabalha em uma posição inclinada. A alimentação deste equipamento é normalmente deslamada. A alimentação nominal é realizada com partículas em torno de $500\mu\text{m}$ e pode ser constituída por um meio denso (água e ferro-silício ou magnetita finamente moídos) e pelo material a ser separado.

A principal vantagem é a alta capacidade de processamento por unidade de volume do aparelho e a habilidade de separar eficientemente partículas mais finas, com granulometrias de até 0,5mm. O sistema não deve conter partículas abaixo de 0,5mm, para evitar a contaminação do meio denso e minimizar as perdas do meio denso no processo.

A alimentação é introduzida tangencialmente e sob pressão. A alta força centrífuga envolvida possibilita a separação. Os produtos pesados sob a ação da força centrífuga movem-se ao longo da parede do ciclone e são descarregados no *underflow* enquanto que os leves migram para o centro (espiral ascendente) e são descarregados pelo *overflow*, Araujo (2007) e Papini (2010).

3.3.3.3. Flotação

A flotação baseia-se na interação da superfície das espécies minerais com os reagentes presentes no sistema. A ciência é denominada como “Físico-química das Interfaces”, “Química de Superfície”, “Química das Interfaces” ou “ Propriedades das Interfaces”, Peres (1999).

Na flotação as partículas devem estar adequadamente liberadas. A principal utilização é concentrar e recuperar as massas de minérios finos de ferro.

Alguns minerais como hematita, quartzo, magnetita, goethita e apatita possuem superfície hidrofílica, polar, com afinidade com a água. Outros minerais como grafita, talco e molibdenita possuem superfície naturalmente hidrofóbica, com afinidade com o ar, que é apolar.

É necessário e de extrema importância prática, estabelecer o pH da solução. A adição de ácidos e de bases proporcionam a alteração da característica das interfaces envolvidas, Araujo (2007).

As interfaces sólido/sólido representam as partículas que são recobertas por lamas. As partículas presentes em um meio aquoso são representadas pela interface sólido/líquido. As partículas que interagem com bolhas de gás são interpretadas como interface sólido/gás. A aplicação dos reagentes no sistema caracteriza a ação da interface líquido/líquido. A interface líquido/gás é representada pela película presente na bolha de gás.

As interfaces podem ser mensuradas através das grandezas de adsorção, tensão superficial e potencial zeta.

A flotação de minério de ferro pode ser realizada basicamente de quatro formas distintas, Cabral (2010):

- flotação de minerais oxidados de ferro, utilizando coletores aniônicos (ácidos carboxílicos e sulfatos), em pH na faixa neutra a ácida;
- flotação de quartzo/silicatos, utilizando coletores aniônicos (ácidos carboxílicos) em pH alcalino, ativado por cálcio;
- flotação catiônica de minerais oxidados de ferro, utilizando aminas como coletores e ativação por flúor, em pH ácido;
- flotação catiônica de quartzo, utilizando aminas, em pH na faixa neutra e alcalina.

A flotação catiônica de quartzo, com a utilização de aminas, é usualmente realizada na

faixa de pH alcalino, onde as propriedades de dissociação e hidrólise deste grupo de reagentes conferem características de coletor e espumante.

Na prática a flotação requer a aplicação de reagentes coletores, espumantes e modificadores. O principal objetivo é aumentar ou reduzir a flotabilidade e fornecer maior seletividade na separação dos minerais, Papini (2010).

Os coletores são responsáveis por alterar a superfície dos minerais, mudando o caráter da superfície de hidrofílico para hidrofóbico. Na flotação de minérios de ferro são utilizadas as aminas primárias, eteraminas primárias, diaminas primárias e eterdiaminas primárias.

Os espumantes são responsáveis por manter os minerais de interesse na superfície. Agem na interface sólido/gás e líquido/gás. Alguns surfatantes são empregados como espumantes.

Os modificadores são responsáveis por agir na interface sólido/sólido e líquido/líquido. Alterando suas características através de ativadores, que são capazes de tornar mais eficaz e seletiva a ação dos coletores. Os depressores são capazes de inibir a ação do coletor e hidrofilar a superfície dos minerais a serem afundados. O depressor mais utilizado na flotação de minério de ferro é o amido de milho ou mandioca. Os desativadores são capazes de remover um ativador da superfície de um dado mineral, tornando-a menos propensa a reagir com o coletor.

O potencial zeta é uma medida da carga na superfície do sólido. Os solutos iônicos presentes na superfície do sólido determinam o potencial zeta, Araujo (2007).

Normalmente as partículas são alimentadas na flotação na faixa de 1 μ m a 600 μ m, sendo necessária a realização da deslamagem para remoção de partículas abaixo de 5 μ m a 10 μ m.

A operação deve ser realizada em equipamentos que propiciem a recuperação dos finos de minério de ferro. Pode ser realizada a flotação reversa ou direta. A alimentação é feita na parte superior do equipamento e a polpa deve ser previamente condicionada

com os reagentes de interesse. As partículas seguem através da trajetória descendentes e encontram-se com as bolhas de ar ascendentes que propiciam a coleta.

As bolhas de ar propiciam a flotação das partículas de interesse.

As células mecânicas possuem capacidade de produção em torno de $3\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ e a coluna de flotação possui capacidade nominal de $2\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ e são os equipamentos normalmente utilizados para exercer a flotação de partículas finas. Novos equipamentos, como a célula *pneufлот*, possuem capacidade nominal de $15\text{m}^3/\text{h}/\text{m}^3$ e apresentam como principal característica alta produção e a maior eficiência na flotação de partículas finas.

3.3.4. Separação Sólido - Líquido

Esta etapa tem a importância de separar as partículas dos minerais do meio aquoso aumentando a porcentagem dos sólidos.

3.3.4.1. Espessamento

A operação de espessamento é realizada por meio da preparação e recuperação de polpas através da sedimentação das partículas em um meio aquoso. A etapa é tratada como separação sólido-líquido. Sua finalidade é preparar a polpa para as etapas seguintes. O processo envolve a porcentagem, granulometria e forma das partículas e características da superfície do sólido que são muito relevantes durante a dispersão e agregação dos sólidos. Trabalha com granulometrias na faixa de $40\mu\text{m}$ a $1\mu\text{m}$ e com capacidade entre $0,18\text{m}^2/\text{t}/\text{h}$ a $0,08\text{m}^2/\text{t}/\text{h}$. As polpas são trabalhadas em espessadores convencionais, espessadores de alta capacidade, espessadores de lamelas ou espessadores E-CAT.

As polpas com menos de 1% até cerca de 50% de sólidos (em massa) são espessadas para 10% a 75%, tendo a fase clarificada concentração da ordem de ppm. A concentração de sólidos no espessador varia desde o *overflow* clarificado até a maior concentração de sólidos do *underflow*, Valadão (2007).

As principais usinas do Quadrilátero Ferrífero utilizam o espessador convencional. São constituídos de um tanque circular, onde a alimentação é realizada pela parte central.

A distribuição dos sólidos da alimentação deve ser homogêneo. Sua parte funcional compreende o alimentador, calha externa de coleta do *overflow*, mecanismo de giro de braços e pás para remoção do *underflow*. Um espessador pode ser compreendido através do cálculo de controle de fluxo de massa do sólido, pelo modelo de Coe e Clevenger. Existem outros modelos que são aplicados no dimensionamento dos espessadores.

$$G = \frac{A}{S} = \frac{V_s}{(D_L - D_D)} = \frac{V_s}{\frac{1}{C_L} - \frac{1}{C_D}}$$

assim:

G = fluxo de massa de sólido na unidade de área (kg/s/m^2).

A = fluxo de massa de sólido da alimentação (massa de sólido / tempo).

S = área transversal ao fluxo.

V_s = velocidade de sedimentação do sólido (m/s).

D_L = diluição da alimentação (massa de líquido / massa de sólido).

D_D = diluição do *underflow* (massa de líquido / massa de sólido).

C_L = concentração de sólidos (massa de sólido / volume de polpa) em L (kg/m^3).

C_D = concentração de sólidos (massa de sólido / volume de polpa) no *underflow* (kg/m^3).

Espessador de alta capacidade é semelhante ao modelo convencional, porém com acréscimo de algumas funções como agitador, placas inclinadas, sensor de controle de altura, alimentador de floculante e câmara de agitação. Desta forma a operação passa a ser rigorosamente controlada e sua produção por área é maior em comparação com os espessadores convencionais.

Durante o espessamento são adicionados ao sistema coagulantes e/ou floculantes, fazendo com que as partículas possam ser agregadas. A superfície das partículas tem sua hidrofilicidade aumentada.

O espessador de lamelas inicialmente trabalha a polpa em um fluxo laminar, escoando entre duas placas horizontais. A partícula sedimenta na superfície de uma placa. A trajetória da polpa começa pela caixa de alimentação e pelo orifício de distribuição de fluxo. O tanque de floculação é responsável por acrescentar floculante ao sistema. A coleta da maior parte do concentrado é realizada pelo *underflow* e a coleta da menor massa é feita pelo *overflow*. O fluxo de polpa entre duas placas paralelas é representado pela velocidade de sedimentação da partícula.

$$V_s \geq \frac{Q}{A}$$

onde:

V_s = velocidade de sedimentação do sólido.

Q = vazão de polpa.

A = área realmente disponível para a sedimentação.

$$T_{\text{sedimentação}} \leq T_{\text{passagem}}$$

onde:

$T_{\text{sedimentação}}$ = tempo necessário à sedimentação.

T_{passagem} = tempo necessário à passagem da polpa pela placa.

Espessador E-CAT, sua finalidade é trabalhar a polpa, proporcionando a formação de uma pasta mineral, com densidades elevadas e baixa presença de água. Seu projeto constitui a parte superior cilíndrica, saída do *overflow*. A parte inferior é cônica, saída do *underflow*. O espessador E-CAT é considerado um equipamento muito eficiente de sedimentação ou de desaguamento de partículas sólidas através da formação de polpas.

3.3.4.2. Filtragem

O principal mecanismo é passagem de polpa através de um meio filtrante, poroso, havendo retenção do sólido e passagem do líquido, ocasionando a formação de torta.

Este mecanismo pode ser descrito pela relação empírica na equação clássica da Lei de Darcy, Valadão (2007).

$$Q_f = \frac{K \times \Delta P \times A}{\mu \times L} = \frac{\Delta P \times A}{\mu \times R}$$

onde:

Q_f = fluxo do filtrado.

A = área transversal ao fluxo.

K = permeabilidade do leito (torta).

ΔP = diferença de pressão.

μ = viscosidade do filtrado.

L = espessura do leito (torta).

$R = L/K$ = resistência oferecida ao fluxo de filtrado.

Os filtros mais eficientes trabalham de forma contínua, com uma força incidente, atuando sobre as partículas de forma a levar a força exercida pelo vácuo a agir através do meio. As principais usinas utilizam os filtros de tambor, de discos e os horizontais.

Alguns métodos e equipamentos são aprimorados com o tempo. O processo de filtração semi-contínua é considerado como novidade para a indústria. Seu desempenho também é avaliado através da relação umidade de torta, taxa unitária de filtração e porcentagem de sólido no filtrado. A alimentação pode ser em faixas granulométricas entre $0,1\mu\text{m}$ a $10\mu\text{m}$, com capacidade de alimentação entre 3t/h/m^2 a 5t/h/m^2 .

O filtro de pressão automático semi-contínuo tem um rendimento que fornece uma umidade de torta entre 7% a 8% mesmo com granulometrias mais finas. A operação consiste na adição de polpas nas câmaras de filtração, introdução do líquido para auxiliar a prensagem da torta por meio de um diafragma presente nas câmaras. As últimas etapas consistem em introduzir ar comprimido nas câmaras de filtração para permitir o retorno do diafragma à posição inicial sendo então realizada a descarga da torta, Valadão (2007).

O filtro a vácuo contínuo possui mecanismo de filtragem composto por uma série de discos ligados entre si por um tubo que executa um movimento de rotação. A formação de torta é realizada nos dois lados de cada disco dentro de uma bacia de polpa mantida sob agitação. A torta é formada pela ação do vácuo. A descarga da torta é feita com auxílio de ar comprimido. A alimentação pode ser em faixas granulométricas entre 0,1 μ m a 50 μ m, com capacidade de alimentação entre 0,6t/h/m² a 2,5t/h/m², Valadão (2007).

3.3.5. Principais Equipamentos Utilizados

As principais jazidas de minérios de ferro mostram uma presença cada vez maior de itabiritos. Assim existe uma tendência em beneficiar minerais de ferro com liberação em faixas granulométricas cada vez mais finas e com menor teor de ferro total. As novas jazidas de minérios de ferro demandam equipamentos com maior capacidade de processamento e que sejam capazes de processar minérios cada vez mais finos. A tabela 1 e tabela 2 apresentam os principais equipamentos utilizados.

Tabela 1 Fluxograma dos principais equipamentos utilizados.

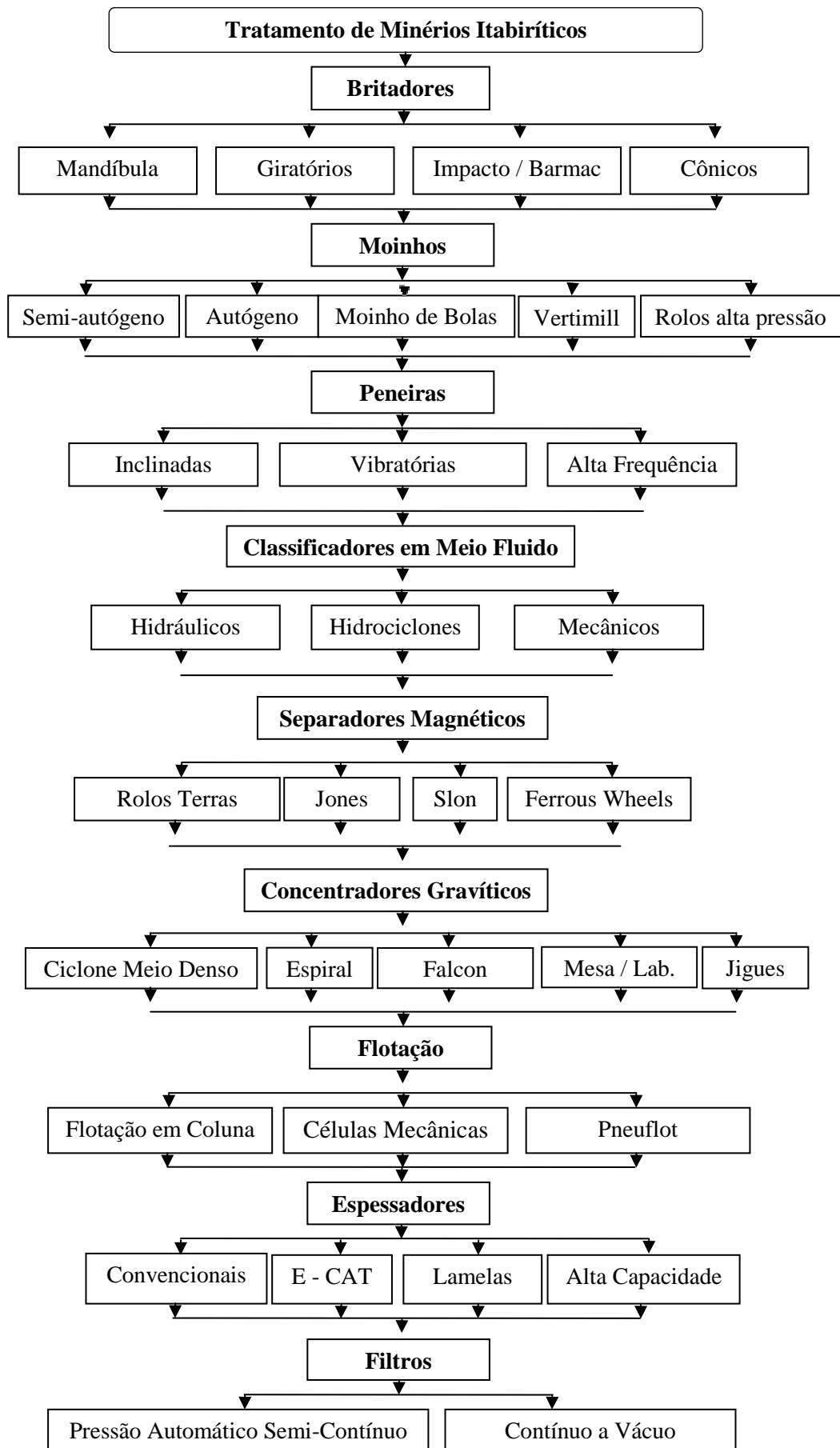


Tabela 2 Descrição dos principais equipamentos utilizados.

Descrição dos Equipamentos			
Descrição dos Métodos/Equipamentos	Equipamentos	Alimentação Nominal	Capacidade de Produção
Britadores	Mandíbulas	500mm a 1500mm	Baixa a média < ou = 1.000t/h
	Giratórios	1000mm a 1600mm	Média a alta > ou = 1.000t/h
	Impacto	200mm a 800mm	Baixa < 1.000t/h
	Cônicos	200mm a 500mm	Alta > 1.000t/h
Moinhos	Semi-Autógenos - SAG	200mm	5.000t/h (11m)
	Autógenos - AG	200mm	3.500t/h (11m)
	Vertimill	0,02mm a 6mm	700t/h
	Moinho de Bolas	< 15mm	500t/h (10m)
	Rolos de Alta Pressão (HPGR)	< 90mm	10t/h a 2000t/h
Peneiras	Vibratórias Horizontais	250 μ m a 100.000 μ m	4-100m ³ /h/m ²
	Inclinadas	250 μ m a 100.000 μ m	4-100m ³ /h/m ²
	Alta Frequência	37 μ m a 100 μ m	
Classificadores em Meio Fluido	Hidráulicos	50 μ m a 500 μ m	
	Hidrociclones	2 μ m a 2000 μ m	
	Mecânicos	44 μ m a 800 μ m	
Separadores Magnéticos	Rolos Terras Raras	0,06mm a 10mm	2 t/h a 12 t/h
	Jones	0,01mm a 1,0mm	10 t/h a 180 t/h
	Ferrous Wheels	0,01mm a 0,15mm	1 t/h a 40 t/h
	Slon	0,006mm a 1,0mm	4 t/h a 80 t/h
Concentradores Gravíticos	Ciclone de Meio Denso	500 μ m	
	Falcon	5 μ m a 6000 μ m	100 t/h
	Mesas	60 μ m a 550 μ m	0,5 t/h a 2 t/h
	Espirais	75 μ m a 1000 μ m	1 t/h a 3 t/h
	Jígues	150 μ m a 12000 μ m	20 t/h
Flotação	Flotação em Coluna	5 μ m a <300 μ m	3 m ³ /h/m ³
	Células mecânicas	10 μ m a 500 μ m	2 m ³ /h/m ³
	Pneufлот	5 μ m a <600 μ m	15 m ³ /h/m ³
Espessadores	Convencionais	1 μ m a 40 μ m	0,18 m ² /t/h
	E – CAT	1 μ m a 40 μ m	
	Lamelas	1 μ m a 40 μ m	
	Alta Capacidade	1 μ m a 40 μ m	0,08 m ² /t/h
Filtros	Contínuo a Vácuo	0,1 μ m a 50 μ m	0,6 t/h/m ² - 2,5t/h/m ²
	Pressão Automático Semi-contínuo	0,1 μ m a 10 μ m	3t/h/m ² -5t/h/m ²

4. CONCLUSÕES

A correta utilização e seleção dos equipamentos propicia ao setor mineral, um maior aproveitamento dos minérios itabiríticos.

Equipamentos com maior capacidade de processamento e que sejam capazes de processar minérios cada vez mais finos devem ser selecionados.

Desta forma podemos concluir que o beneficiamento é favorecido por uma mistura de técnicas novas e convencionais.

5. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Análise da flotação de minério de ferro com partículas finas e ultrafinas.

Tratamento de minério de ferro portador de partículas finas e ultrafinas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALKMIM, F.F.; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton; Evidence for Paleoproterozoic Collision and Collapse in the Quadrilátero Ferrífero. Minas Gerais, Brazil: Precambrian Research, 1998. p.29-58.

ARAUJO, A.C.; GALERY, R.; VALADÃO, G.E.S.; VIANA, P.R.M. Fragmentação. In: ARAUJO, A.C.; VALADÃO, G.E.S. Introdução ao Tratamento de Minérios. 1 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007. cap.5. p.85-103.

ARAUJO, A.C.; PERES, A.E.C.; SALUM, M.J.G.; VALADÃO, G.E.S. Métodos de Concentração. In: ARAUJO, A.C.; VALADÃO, G.E.S. Introdução ao Tratamento de Minérios. 1 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007. cap.6. p.105-139.

BERALDO, J.L. Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1987. 137p.

BRANDÃO, P.R.G.; CANÇADO, R.Z.L.; SANTOS, L.D.; VASCONCELOS, O.R. Caracterização Mineralógica e Tecnológica. In: ARAUJO, A.C.; VALADÃO, G.E.S. Introdução ao Tratamento de Minérios. 1 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007. cap.3. p.27-60.

BOND, F.C. The Third Theory of Cominution. AIME. Transaction. 1952. p.193-484.

CABRAL, S. A. Rotas de Processo para Minérios Goethíticos. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2010. 100p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia Mineral).

CARRISSO, R.C.C.; CORREIA, J.C.G. Classificação e Peneiramento. In: ALMEIDA, S.L.M.; LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A. Tratamento de Minérios. 4 ed. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral – CETEM, 2004. cap.5, p. 197 – 237.

DANA, J.D. Manual de Mineralogia. 1 ed. Rio de Janeiro: Técnicos e Científicos Editora S.A., 1984. 642p.

FONTENELLE, G.A. Caracterização Mineralógica e Tecnológica de Minério Itabirítico da Mina do Ponto III, Congonhas – MG. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1994. 107p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia Mineral).

GALERY, R.; MONTENEGRO, L.C.M.; VALADÃO, G.E.S. Separação por Tamanho. In: ARAUJO, A.C.; VALADÃO, G.E.S. Introdução ao Tratamento de Minérios. 1 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007. cap.4. p.61-84.

GAUDIN, A.M. Liberation. In: GAUDIN, A.M. Principles of Mineral Dressing. 1 ed. New York and London: McGRA W-HILL BOOK COMPANY, Inc., 1939. cap.4. p.70-91.

GROSS, G.A. General Geology and Evaluation of Iron Deposits. Canadá. Geology of Iron Deposits in Canadá. Survey of Canadá. Canadá: Economic Geology Report, 1965. 181p.

GUPTA, A.; YAN, D. Mineral Processing Design and Operations. Amsterdam. 1 ed. Elsevier. 2006.

JAMES, H.L. Sedimentary Facies of Iron-Formation. v 49, n. 3. Economic Geology, 1954. p.235-293.

KELLY, E.G.; SPOTTISWOOD, D.J. Introduction to Mineral Processing. New York: Jhon Wiley & Sons, 1982.

MANUAL PARA NORMALIZAÇÃO DE PUBLICAÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS, Belo Horizonte. 8 ed. rev. Belo Horizonte, 2009. 258p.

METSO. Processo de Moagem de Minério de Ferro. Metso Minerals, 2011. www.metso.com.br

MONTENEGRO, L.C.M. Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2010. Notas de Aula. Curso de Pós Graduação em Engenharia de Minas – DEMIN.

PAPINI, R.M. Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2010. Notas de Aula. Curso de Pós Graduação em Engenharia de Minas – DEMIN.

PERES, A.E.C. Flotação. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1999. 298p.

SANTOS, L.D. Caracterização Microestrutural de Minério de Ferro do Quadrilátero Ferrífero – MG. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2002. 178p. (Tese, Doutorado, Tecnologia Mineral).

SANTOS, W.K. Rotas de Processo para Concentração de Minérios Itabiríticos e Hematíticos da Mina de Fábrica. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2009. 155p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia Mineral).

SOUZA, E.S. Rota do Processo para aproveitamento de Rochas Itabiríticas Estéreis da Mina de Conceição. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2005. 95p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia Mineral).

VALADÃO, G.E.S. Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2010. Notas de Aula. Curso de Pós Graduação em Engenharia de Minas – DEMIN.

VALADÃO, G.E.S. Separação Sólido-Líquido. In: ARAUJO, A.C.; VALADÃO, G.E.S. Introdução ao Tratamento de Minérios. 1 ed. Belo Horizonte: UFMG, 2007. cap.7. p.141-161.

VIANNA, S.M. Caracterização de Dois Minérios de Ferro Itabiríticos do Quadrilátero Ferrífero, MG. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 1993. 162p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia Mineral).