

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais
CEERMIN – Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais

MONOGRAFIA

Equipamentos de separação magnética – uma revisão

Aluno: Samuel Almeida Pimenta

Orientadora: Professora Rísia Magriotis Papini

Agosto 2014

P664e Pimenta, Samuel Almeida.
Equipamentos de separação magnética – uma revisão [manuscrito]
/ Samuel Almeida Pimenta. - 2014.
38 f., enc.: il.

Orientadora: Rísia Magriotis Papini.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em
Engenharia de Recursos Minerais da Universidade Federal de
Minas Gerais.

Bibliografia: f. 37-38.

1. Engenharia de minas. 2. Minérios de ferro. 3. Separação magnética
de minério. I. Papini, Rísia Magriotis. II. Universidade Federal de Minas
Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

- A presença de Deus ao meu lado.
- A Professora Rísia Magriotis Papini, minha orientadora, pela sua atenção durante a preparação do trabalho.
- Aos colegas do curso de pós graduação pelo incentivo.
- A minha namorada Patrícia que muito me apoiou ao longo do curso e da elaboração deste trabalho.
- Aos membros da Banca Examinadora, pela leitura do texto e pelas sugestões oferecidas ao trabalho.
- Aos amigos e amigas que não foram citados e que sempre estiveram comigo me auxiliando.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	7
2.	OBJETIVO E RELEVÂNCIA	8
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
3.1	Definição de Separação Magnética.....	9
3.1.1	Magnetismo	9
3.1.2	Ferromagnetismo	10
3.1.3	Paramagnetismo	10
3.1.4	Diamagnetismo.....	10
3.2	Separação Magnética	12
3.2.1	Susceptibilidade Magnética.....	12
3.2.2	Partículas submetidas à ação de campo magnético	13
3.3	Variáveis do Beneficiamento Magnético.....	14
3.3.1	Intensidade de Campo Magnético	14
3.3.2	Alimentação.....	14
3.3.3	Avanços na Separação Magnética	15
3.4.1	Separadores Magnéticos de Baixa Intensidade	19
3.4.3.1	Separador Magnético de Baixa Intensidade a Úmido	20
3.4.4	Separadores Magnéticos de Alta Gradiente.....	23
3.5	Principais Modelos de Separadores Magnéticos utilizados para minérios	25
3.5.1	Separadores Magnéticos tipo Carrossel.....	25
3.5.2	Separadores Magnéticos Slon.....	30
3.6	Inovação em Separador Magnético modelo Hexapolar	32
3.6.1	Características do GHX-1400.....	33
4.	CONCLUSÕES	36
5.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Intensidade de Campo Magnético.....	9
Figura 3.2 - Indução magnética para diferentes espécies mineralógicas. Fonte: LUZ, 2004.	11
Figura 3.3 - Demonstração de partículas submetidas á ação de campo magnético. Fonte: SILVA, 2008.	13
Figura 3.4 - Classificação, características e aplicações de alguns separadores magnéticos. Fonte: LUZ, 2004.	17
Figura 3.5 - Separador magnetico Steinert de correia cruzada. Fonte: SVOBODA, 2003.	20
Figura 3.6 - Separadores magnéticos de baixa intensidade. Fonte: STEINERT, 2012. .	20
Figura 3.7 - Configuração dos polos em separadores magnéticos de tambores. Fonte: SILVA, 2008.	21
Figura 3.8 - Tambor Magnético da Steinert. Fonte: STEINERT, 2012.	22
Figura 3.9 - Separador Magnético de Tambor WDRE. Fonte: INBRAS, 2014.	23
Figura 3.10 - Separadores magnéticos de alto gradiente HGMS. Fonte: METSO, 2014.	24
Figura 3.11 - Desenho esquemático de um concentrador eletromagnético de carrossel. Fonte: RIBEIRO, 2010.	25
Figura 3.12 - WHIMS Tetrapolar modelo GX-3600. Fonte: RIBEIRO, 2010.	26
Figura 3.13 - Linha neutra bipolar 2 pontos de alimentação/rotor. Fonte: RIBEIRO, 2010.	27
Figura 3.14 Linha neutra Tetrapolar 4 pontos de alimentação/rotor. Fonte: Fonte: RIBEIRO, 2010.	27
Figura 3.15 - Separador GX 3600. Fonte: RIBEIRO, 2010.	29
Figura 3.16 - Desenho esquemático do separador Slon. Fonte: ZENG e DAHE, 2003. .	30
Figura 3.17 - Separador GHX 1400. Fonte: GAUSTEC, 2014.	32
Figura 3.18 - Separador GHX 1400. Fonte: GAUSTEC, 2014.	33
Figura 3.19 - Campo Magnético X Potência Elétrica. Fonte: GAUSTEC, 2014.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Imãs permanentes típicos e sua intensidade de campo magnético.....	10
Tabela 3.2 - Relação dos principais minerais X faixa de campo magnético. Fonte: CATÁLOGO ERIEZ MAGNETICS.....	18
Tabela 3.3 - Classificação de separadores magnéticos industriais. Fonte: LUZ, 2004. .	19

RESUMO

A busca por processos mais eficientes do ponto de vista da produtividade, custos de investimento e operação é uma constante no setor de beneficiamento mineral. Portanto, na elaboração de um circuito de tratamento de minério de ferro é imprescindível o conhecimento das principais características dos equipamentos que fará parte da planta de beneficiamento de minério de ferro. Neste trabalho serão apresentadas algumas importantes características do processo de separação magnética através de uma pesquisa bibliográfica, tendo como destaque ao equipamento GHX 1400 que surge no mercado como um produto com inovações tecnológicas e atualmente tem a maior taxa de alimentação de minério de ferro. Constata-se que as variáveis operacionais para o processo de separação magnética não é trivial, uma vez que as mesmas estão ligadas ao tipo de separador ou ao próprio método de separação.

Palavras-chaves: Separação Magnética, Equipamento, Beneficiamento.

ABSTRACT

The search for more efficient methods from the viewpoint of productivity, cost of investment and operation is a constant in the mineral processing industry. Porting the development of a processing circuit of iron ore is essential to know the main features of the equipment that will be part of the beneficiation of iron ore plant. In this work we present some important features of the magnetic separation process through a literature search, with the emphasis on the 1400 GHX equipment appears on the market as a product with technological innovations and currently has the highest rate of supply of iron ore. It is noted that the operational variables for the magnetic separation process is not trivial, since the same are tied to the type of separator or separation method itself.

Keywords: Magnetic Separation Equipment, Beneficiation.

1. INTRODUÇÃO

A separação magnética é um método de grande relevância dentro de um circuito de processamento de minérios para concentração de muitas substâncias minerais. Pode ser utilizada, dependendo das diferentes respostas ao campo magnético das espécies mineralógicas individualmente e quanto aspecto econômico de investimento do equipamento versus retorno obtidos dentro do circuito de beneficiamento de minério.

A propriedade de um mineral que determina sua resposta a um campo magnético é denominada de susceptibilidade magnética. Com base nessa propriedade, os minerais são classificados em duas categorias: aqueles que são atraídos pelo campo magnético e os que são repelidos por ele. No primeiro caso incluem-se os minerais ferromagnéticos, os quais são atraídos fortemente pelo campo, e os paramagnéticos, que são atraídos fracamente. Aqueles que são repelidos pelo campo denominam-se de diamagnéticos.

A separação magnética é uma técnica amigável ambientalmente e pode ser usada tanto a seco como a úmido, viabilizando o seu uso em regiões áridas ou onde há disponibilidade de água. O método a seco é usado, em geral, para granulometria grossa e o a úmido para aquelas mais finas. Na história da separação magnética verifica-se avanços em ambos os métodos, sem contar a utilização da tecnologia dos supercondutores, que abriu um novo horizonte na área de processamento de minérios.

O desenvolvimento da separação magnética evoluiu para uma tecnologia que permite separar, desde materiais fortemente magnéticos a fracamente magnéticos, mesmo que sob a forma de partículas finamente dispersas. Isso resultou no desenvolvimento da separação magnética de alta intensidade (*high intensity magnetic separation* - HIMS) e da separação magnética de alto gradiente (*high gradient magnetic separation* – HGMS), que usa eletromagnetos resistentes (baixa condutividade) ou supercondutores ou magnetos permanentes.

2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA

Este trabalho tem por objetivo a exposição de forma genérica, do processo de concentração de minério de ferro por separação magnética, apresentando: as principais características desse processo e os tipos de equipamentos mais utilizados na mineração para concentração de minério de ferro.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Definição de Separação Magnética

“É comum a indústria de separadores magnético fazer uma distinção entre separação magnética” e “concentração magnética”. Emprega-se o primeiro termo para aquelas aplicações em que se deseja retirar um rejeito magnético e em que o fluxo não magnético é o produto de interesse. Já o termo “concentração magnética” tende a ser mais empregado para aquelas aplicações em que o produto útil é constituído pelo fluxo contendo os minerais atraídos pela ação do campo magnético aplicado. Essa distinção não é necessária, sob o ponto de vista dos princípios do método.

3.1.1 Magnetismo

É o ramo da Física que estuda os materiais magnéticos, ou seja, que estuda materiais capazes de atrair ou repelir outros. O campo magnético é uma região do espaço onde se manifesta o magnetismo, através das chamadas ações magnéticas. A intensidade Magnética em um campo magnético com intensidade em Tesla é o fluxo total que atravessa uma superfície de um metro quadrado perpendicular ao campo (figura 3.1).

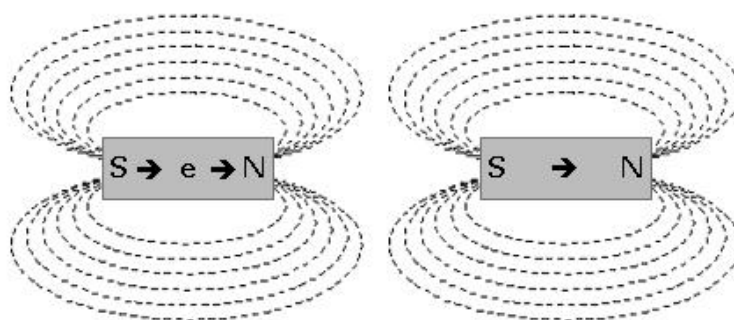


Figura 3.1 - Intensidade de Campo Magnético.

Os ímãs permanentes tipicamente utilizados na concentração de fases ferromagnéticas ou paramagnéticos podem ser vistos na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Imãs permanentes típicos e sua intensidade de campo magnético.

Ferrite	até 0,15 tesla
AlNiCo	até 0,15 tesla
Estrôncio	até 0,20 tesla
RE (Terras Raras)	até 2,10 teslas

3.1.2 Ferromagnetismo

Nos materiais ferromagnéticos os dipolos elementares são permanentes e, aparentemente, se alinham na direção de um campo magnético aplicado, resultando em elevados níveis de magnetização. Os dipolos formam regiões distintas chamadas domínios. Em cada domínio, os dipolos têm o mesmo alinhamento.

3.1.3 Paramagnetismo

Nos materiais paramagnéticos os dipolos elementares são permanentes e, na presença de um campo magnético, tendem a se alinhar com o mesmo, mas o alinhamento perfeito é impedido pelo movimento térmico. A magnetização do material varia linearmente com o campo magnético aplicado e a temperatura.

3.1.4 Diamagnetismo

Nos materiais diamagnéticos os dipolos elementares não são permanentes. Se um campo magnético é aplicado, os elétrons formam dipolos opostos ao campo atuante. Assim, o material sofre uma repulsão. Mas é um efeito muito fraco. Por sofrerem repulsão, a suscetibilidade magnética desses materiais é negativa, com valores de seu módulo muito baixos. A rigor o diamagnetismo é inerente a toda a matéria, como decorrência da lei de Lenz. Como esse efeito é muito fraco, ele fica totalmente mascarado nos materiais paramagnéticos e ferromagnéticos.

A figura 3.2 mostra a indução magnética para diferentes espécies mineralógicas, em função da intensidade de campo aplicado. Observa-se que os minerais ferromagnéticos (curva a) apresentam resposta rápida da indução magnética com o campo. Na curva b isso ocorre, porém menos acentuado, são os minerais paramagnéticos. No caso da curva c a situação é inversa, a indução magnética apresenta valor negativo, isso é observado com os minerais diamagnéticos (LUZ, 2004).

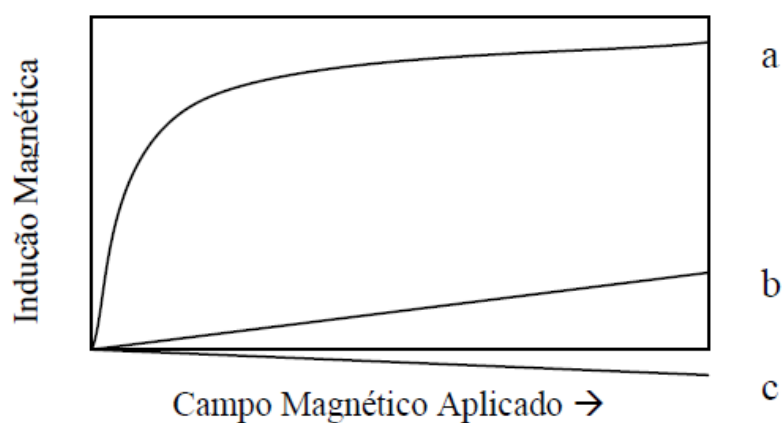


Figura 3.2 - Indução magnética para diferentes espécies mineralógicas. Fonte: LUZ, 2004.

a)ferromagnéticas, b)paramagnéticas e c)diamagnéticas

3.2 Separação Magnética

3.2.1 Susceptibilidade Magnética

A propriedade de um material que determina a sua resposta a um campo magnético é chamada de susceptibilidade magnética.

São divididos nas seguintes categorias:

- Minerais ferromagnéticos: São minerais atraídos fortemente por campo magnético. Ex. magnetita
- Minerais paramagnéticos: São minerais atraídos fracamente por campo magnético. Ex. hematita, cromita, etc.
- Minerais diamagnéticos: São minerais repelidos por campo magnético. Ex. quartzo, cerussita, calcita, etc.

Um ímã funciona como se o campo de sua atuação formasse dois polos. Os polos são iguais em força e opostos em sinal. A atração ou repulsão se expressa quantitativamente, como (3.1):

$$F = \frac{1}{y} \times \frac{m_1 \times m_2}{d^2} \quad (3.1)$$

Onde:

F = Força em newtons.

m1 e m2 = massas das partículas

d = distância dos polos em metros

y = constante, dependendo do meio. Esta constante “Permeabilidade Magnética” varia de 200 a 2000, e é comum em substâncias ferromagnéticas ou ligas. Em ligas de ferro, silício e alumínio ela chega a 162.000 e em outras ligas pode chegar a 60.000.

3.2.2 Partículas submetidas à ação de campo magnético

No momento em que uma partícula magnetizável é colocada sob a ação de um campo magnético não homogêneo, ela sofre a ação da força magnética dada por:

A magnetização B (Tesla), que representa o número de linhas de força passando pela unidade de área do material, está relacionada com a intensidade de magnetização M (ampere/m) pela equação (3.2):

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (3.2)$$

onde:

μ_0 = permeabilidade no espaço = $4\pi \times 10^{-7}$ (Tesla.metro/ampere)

No vácuo $M = 0$ e no ar seu valor é muito baixo, expressa por (3.3):

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} \quad (3.3)$$

Em um separador magnético, ocorre sobre a partícula a atuação de várias forças (Figura 3.3), que podem somar ou competir entre si. Essas são, entre outras, a força da gravidade, inércia, arraste hidrodinâmico e ainda forças superficiais entre as partículas.

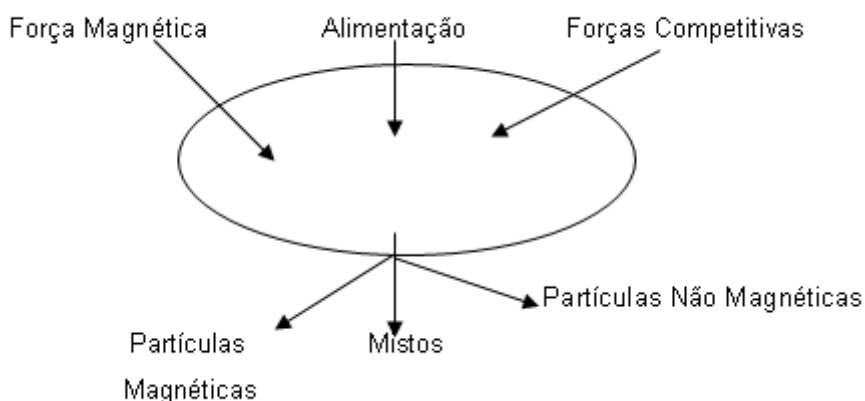


Figura 3.3 - Demonstração de partículas submetidas à ação de campo magnético. Fonte: SILVA, 2008.

3.3 Variáveis do Beneficiamento Magnético

3.3.1 Intensidade de Campo Magnético

A natureza do campo magnético tem marcada influência na separação dos diferentes tipos de minerais. O controle da intensidade de campo permite a separação seletiva das partículas com diferentes valores na suscetibilidade magnética (LUZ, 2004).

Baixa intensidade de campo separa minerais com elevada susceptibilidade, e com alta intensidade separam-se aqueles com valores mais baixos de susceptibilidade. O controle da intensidade de campo pode ser feito com o emprego de eletroímãs, variando a corrente elétrica. (LUZ, 2004).

Para alguns separadores pode-se variar o campo mediante ajuste prévio da distância entre os dois polos.

3.3.2 Alimentação

O controle da velocidade de passagem das partículas minerais, através do campo magnético, constitui uma das variáveis operacionais. No caso da separação a seco, é conveniente que o leito das partículas que atravessa o campo não seja espesso (SILVA, 2008):

- Somente as partículas situadas na superfície do leito serão atraídas pelo campo;
- Partículas magnéticas situadas na camada inferior do leito poderão arrastar aquelas não magnéticas (por apreensão mecânica ou engaiolamento).

Nos separadores a úmido não há grande velocidade das partículas na direção da maior intensidade de campo, devido à resistência oferecida pela água.

Além de controle da alimentação, em alguns casos, é usado o recurso da reversão na polaridade para minimizar o efeito de adesão.

ARAÚJO (2010) apresenta duas principais variáveis de controle operacional de um separador magnético, primeiro o percentual de sólidos na alimentação, tendo em vista que esse parâmetro impacta diretamente na eficiência do processo. O Controle é feito pelo operador, com base em sua experiência do processo em uma caixa (*sump*) de maneira prévia à adição da polpa no separador. A segunda variável é a pressão da água de lavagem do concentrado e do material intermediário. Uma pressão muito alta na retirada do material intermediário pode significar perda de material de interesse. Por outro lado, pressão baixa não é eficaz para a retirada da impureza. O jato de água para a retirada do mineral magnético, uma pressão muito alta causa perda de água desnecessariamente, sendo que uma pressão baixa pode não ser suficiente para a sua retirada.

3.3.3 Avanços na Separação Magnética

O uso da tecnologia de supercondutores combinada ao princípio da separação magnética em tambor resultou em um dos maiores avanços no processamento de materiais paramagnéticos. Dessa forma, a combinação resultou na obtenção de um campo magnético com intensidade elevada. Esta separação, adequando ao tratamento de minerais com baixas suscetibilidades magnéticas mesmo a granulometria finas, apresenta, entre outras, as seguintes vantagens (SILVA, 2008):

- O emprego de campo magnético acima de 4,0 T;
- Elevada taxa de produção tanto para material fino quanto grosso;
- Não há aprisionamento do material grosso ou fortemente magnético dentro da área de maior densidade de fluxo magnético;
- Possui a vantagem de se operar tanto a seco quanto a úmido, para um mesmo sistema.

Embora os separadores com supercondutores apresentem razões que justificam sua utilização, ainda são encontradas dificuldades na sua aplicação em alta escala. A economia real de energia não é tão elevada, pois as operações de resfriamento das bobinas apresentam um alto consumo de energia. A alta nos custos de energia elétrica tornou um dos obstáculos na utilização do processo de separação magnética. Um avanço foi dado na construção de ímãs permanentes usando ligas de samário-cobalto (Sm-Co) e de neodímio-ferro-boro (Nd-Fe-B), possibilitando a obtenção de um ímã permanente

capaz de induzir um campo com intensidade de 1,8 T e também gradiente elevado. As características tanto de campo quanto de gradiente são similares às obtidas com separadores que utilizam eletroímãs (LUZ, 2004).

O novo tipo de equipamento proporciona, entre outras, as vantagens:

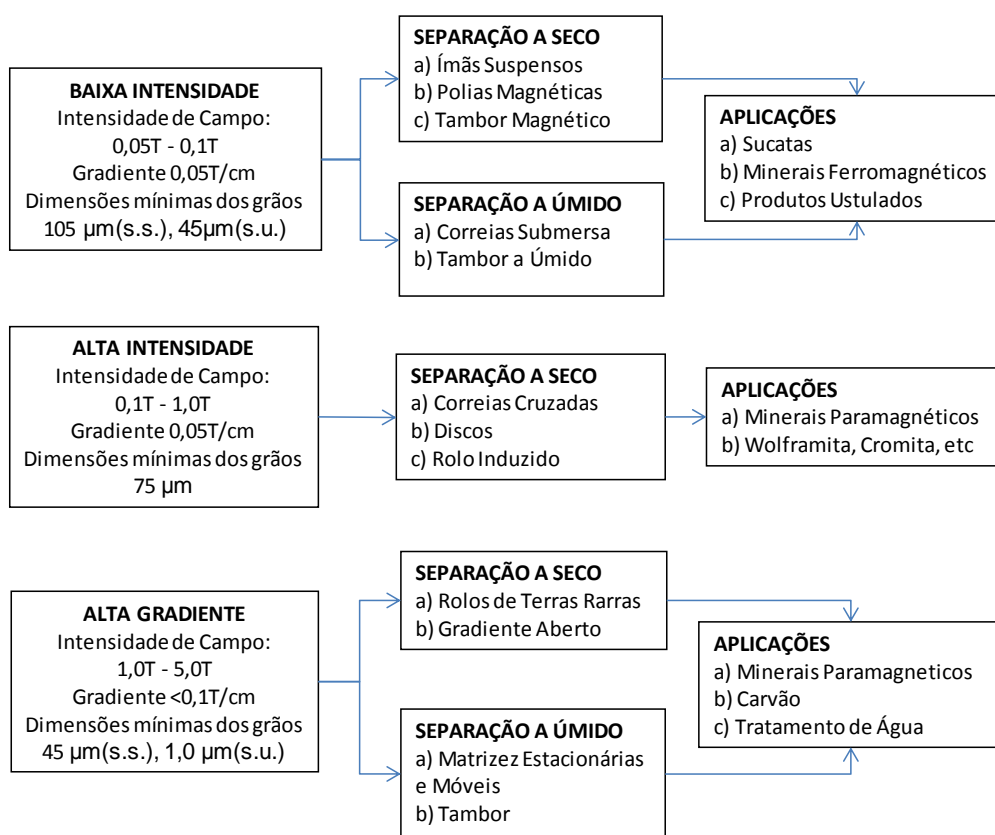
- Assegura maior densidade de fluxo magnético, mesmo para o caso de alimentação com granulometria grossa;
- Baixo custo operacional e de capital para instalação de capacidade média, viabilizando, em particular, sua aplicação às purificações de refratários, materiais, cerâmicos e minerais industriais;
- Possibilidade de operação com materiais contaminados com substâncias ferromagnéticas e ausência de aquecimento, comum aos eletroímãs;
- Flexibilidade operacional que permite variar o campo magnético mediante o deslocamento do tambor.

Espera-se, no entanto, o desenvolvimento de novos materiais para construção de ímãs permanentes, em decorrência dos elevados custos de obtenção dos elementos de terras raras. Sabe-se que a área de aplicação para esse novo tipo de equipamento está assegurada. Existe, todavia, a expectativa de desenvolver equipamentos com maior desempenho, visando o aumento da capacidade e redução do custo por unidade instalada (LUZ, 2004).

3.4 Classificação dos Separadores Magnéticos

Na atualidade várias propostas de classificação de separadores magnéticos tem sido introduzidas e, provavelmente, o mais prático e lógico é a classificação dos separadores como secos ou úmidos. Ainda, deve-se salientar que os separadores podem operar com campos magnéticos de alta ou baixa intensidade e/ou gradientes altos ou baixos (SILVA, 2008).

A forma dos elementos que executam o trabalho de separação no equipamento exerce influencia significativa sobre a classificação dos separadores. Assim são denominados separadores de tambor, de rolos induzidos, de correias cruzadas, de carrossel etc. A figura 3.4 demonstra a classificação, características e aplicações de alguns separadores magnéticos (SILVA, 2008).



Legendas: s.s. separação a seco ; s.u. separação a úmido

Figura 3.4 - Classificação, características e aplicações de alguns separadores magnéticos. Fonte: LUZ, 2004.

A escolha da classe do separador a ser empregado depende de várias considerações, sendo as mais importantes a distribuição granulométrica e a distribuição magnética do produto a ser beneficiado e ainda a capacidade de equipamento (SVOBODA,2003).

A tabela 3.2 indica os principais minerais correlacionando com a faixa do campo magnético adequado para a realização do processo de separação magnética.

Tabela 3.2 - Relação dos principais minerais X faixa de campo magnético. Fonte: CATÁLOGO ERIEZ MAGNETICS.

Grupo 1 - Ferromagnéticos - Faixa de Campo de 0,05 a 0,5 T		
Ferro		Magnetita
Grupo 2 - Magnéticos - Faixa de Campo de 0,5 a 1 T		
Ilmenita	Pirrotita	Franklenita
Grupo 3 -Fracamente Magnéticos - Faixa de Campo de 1 a 1,8 T		
Hematita	Mica	Calcopirita
Siderita	Molibdenita	Molibdenita
Rodonita	Cerargirita	Talco
Limonita	Huebnerita	Titanita
Braunita	Wolframita	Calcocita
Corindon	Bornita	Cinábrio
Pirolusita	Apatita	Gesso
Manganita	Tetrahedrita	Zincita
Calamina	Willemita	Ortoclásio
Esfarelita	Cerussita	Epidoto
Siderita	Dolomita	Fluorita
Rodocrosita	Psilomelana	Augita
Granada	Arsenopirita	Homblenda
Serpentinita		
Grupo 4 - Muito Fracamente Magnéticos - Faixa de Campo acima de 1,8 T		
Pirita	Serpentinita	Cobalita
Smithsonita	Nicolita	Safira
Esfalerita	Diopsídio	Cassiterita
Estibinita	Turmalina	Ortoclásio
Criolita	Cuprita	Dolomita
Enargita	Galena	Spinélio
Berílio	Whiterita	Rubi
Magnesita	Crisocola	Covelita
Azurita	Rutilo	Feldspato
Gesso	Mica	Zircão
Malaquita		
Grupo 5 - Não Magnéticos e Diamagnéticos		
Barita	Corindon	Apatita
Bismuto	Topázio	Aragonita
Calcita	Galena	Grafita
Fluorita	Antimônio	

A força de atração magnética exercida sobre uma partícula mineral depende da susceptibilidade magnética do mineral, da massa da partícula e das condições (intensidade e gradiente) do campo magnético aplicado. A tabela 3.2 apresenta uma

classificação dos minerais para fins de processamento mineral com base nessa força magnética. Com base nos dados da literatura sobre susceptibilidade magnética e na classificação dos minerais para fins de beneficiamento apresentada na tabela 3.2, verifica-se que o principal intervalo para separação dos silicatos varia de 10.000 a 20.000 Gauss, sendo necessária a utilização de um separador magnético com alto gradiente de campo para remoção dos mesmos e concentração dos não magnéticos apatita e carbonatos.

A tabela 3.3 apresenta os tipos de separadores magnéticos classificados conforme a intensidade de campo magnético e o gradiente de campo, ressaltando-se que a força magnética que atua sobre uma partícula aumenta em função dessas duas variáveis e sem gradiente de campo não há força magnética.

Tabela 3.3 - Classificação de separadores magnéticos industriais. Fonte: LUZ, 2004.

Classificação	Intensidade de campo (Gauss)	Gradiente de campo (Gauss/cm)	Granulometria mínima (mm)	
			Separação a seco	Separação a úmido
Baixa intensidade	600 - 1.000	500	0,105	0,045
Alta intensidade	1.000 - 10.000	500	0,075	-
Alto gradiente	10.000 - 50.000	< 1.000	0,045	0,001

3.4.1 Separadores Magnéticos de Baixa Intensidade

3.4.1.1 Separadores Magnéticos de Baixa Intensidade a Seco

A aplicação deste separador magnético é na remoção de sucatas e impurezas altamente magnéticas ou na concentração de metais de alto magnetismo com valor agregado. Magnetos suspensos, de esteiras e placas magnéticas são usualmente utilizados para cumprir tais tarefas como o separador magnético de correia cruzada “*crossbelt*” observada na figura 3.5 (SVOBODA, 2003).



Figura 3.5 - Separador magnetico Steinert de correia cruzada. Fonte: SVOBODA, 2003.

Os separadores magnéticos de baixa intensidade (LIMS) recuperam minérios ferromagnéticos na produção de pré-concentrados ou concentrados. O sistema magnético permite altíssimo carregamento com excelente seletividade e máxima recuperação, o que reduz o número de unidades necessárias. Menos máquinas implicam menos manutenção, menos capital e menores custos operacionais (figura 3.6).

Para material seco com granulação de 20 mm ou mais, é preferível usar o separador com tambor de correia.



Figura 3.6 - Separadores magnéticos de baixa intensidade. Fonte: STEINERT, 2012.

3.4.3.1 Separador Magnético de Baixa Intensidade a Úmido

Conhecidamente, o separador magnético de baixa intensidade a úmido mais utilizado é o de tambores. Estes separadores são utilizados na recuperação de magnetita e

ferrosilício, os quais são utilizados na formação de meios-densos. O princípio de funcionamento destes separadores é baseado em magnetos permanentes, os quais podem ser orientados de forma radial ou axial ao tambor. Na configuração radial, demonstrada na figura 3.7, a polaridade dos magnetos é alternada ao longo do eixo do tambor, enquanto na configuração axial, os polos são alternados no decorrer da circunferência do tambor. A configuração radial é normalmente aplicada onde a recuperação de materiais altamente magnéticos é importante, já o sistema axial é utilizado quando se objetiva um alto teor de concentrado. O movimento e a agitação das partículas sobre os magnetos com polaridades alternadas facilita a remoção das partículas não magnéticas incrustadas gerando um aumento no teor do concentrado (SVOBODA, 2003).

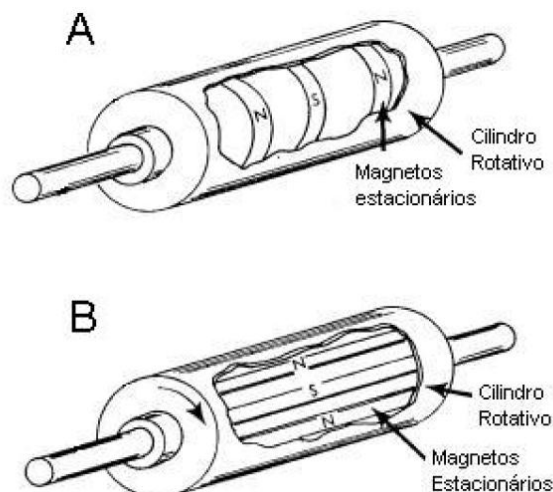


Figura 3.7 - Configuração dos polos em separadores magnéticos de tambores. Fonte: SILVA, 2008.

A figura 3.8 apresenta o separador magnético de tambores, do fabricante Steinert, esse equipamento destaca-se por operarem nos principais centros de mineração espalhados pelo mundo e na América do Sul já estão sendo utilizados pelas principais mineradoras presentes no Brasil. O tambor varia, pois o campo magnético pode atingir em torno de 1500 a 7000 Gauss. “Os “tambores de média intensidade são fornecidos, tipicamente, com um tambor de diâmetro de 24”, já os de baixa intensidade podem ter até 48” de diâmetro.



Figura 3.8 - Tambor Magnético da Steinert. Fonte: STEINERT, 2012.

A figura 3.9 apresenta outro modelo é o Separador Magnético de Tambor WDRE que foi desenvolvido pela INBRAS para atender o tratamento de minérios que requerem níveis de campo magnético da ordem de até 7000 Gauss. É recomendado para a concentração de minerais ferrosos nas granulometrias de *sinter feed* e *pellet feed*, que requeiram um nível de campo magnético médio para serem concentrados, como martita e hematita porosa. Pode operar isoladamente, em estágio único, fazendo a concentração final do minério, ou em dois estágios, em conjunto com o Concentrador WHC, de alta intensidade. O Separador WDRE é fabricado em diversos modelos, podendo atingir capacidades de até aproximadamente 180 t por hora.



Figura 3.9 - Separador Magnético de Tambor WDRE. Fonte: INBRAS, 2014.

3.4.4 Separadores Magnéticos de Alta Gradiente

Os separadores magnéticos de alto gradiente recuperam material ferromagnético ou paramagnético de polpas de minério. Os separadores são projetados em torno do exclusivo sistema magnético capaz de produzir campos de até 2 T (20.000 Gauss).

O separador movimenta partículas desde 0,1 até 1 mm com superior desempenho metalúrgico, devido aos excelentes parâmetros de controle. O HGMS cíclico é mais adequado para materiais com até 5% de frações magneticamente produzidas. Sem outras peças móveis, além das válvulas atuadas que governam as velocidades da polpa controlada, o custo de manutenção é extremamente baixo.

Existem separadores magnéticos de alto gradiente em construção cíclica com diâmetros do vaso de processo desde 220 até 3.050 mm, e em construção contínua com diâmetros médios do anel matriz de 1.200, 1.850, 2.500 e 3.500 mm, vide figura 3.10.



Figura 3.10 - Separadores magnéticos de alto gradiente HGMS. Fonte: METSO, 2014.

Este separador caracteriza-se por um campo magnético de alta intensidade criado por eletroímã. Ele é dividido em dois níveis que trabalham simultaneamente, em cada nível existem diversas caixas de trabalho (contendo as matrizes magnéticas). Essas caixas de trabalho são constituídas por um conjunto de placas, ranhuradas e dispostas de forma paralela, que recebem a polpa de alimentação sob a ação do campo. A presença das placas reforça, de maneira muito significativa, o campo magnético aplicado através de gradiente de campo magnético criado, quando as linhas de força do campo magnético são concentradas nas ranhuras das placas. As partículas paramagnéticas são atraídas para a superfície das placas, ficando presas. O movimento rotatório leva esse material a um ponto onde há um fluxo de água descendente atravessando as placas para a retirada de um produto com características intermediárias (médios), ainda sob a ação do campo. O próximo ponto alcançado já está fora da ação do campo e um novo jato de água faz a retirada do concentrado.

3.5 Principais Modelos de Separadores Magnéticos utilizados para minérios

3.5.1 Separadores Magnéticos tipo Carrossel

Os concentradores eletromagnéticos de carrossel possuem dois níveis, que trabalham de forma simultânea. Há em cada nível uma estrutura circular com movimento rotatório que contém diversas caixas de trabalho. Estas caixas de trabalho são constituídas por um conjunto de placas, ranhuradas e dispostas de forma paralela, que recebem a polpa de alimentação que é efetuada sob ação do campo magnético. As partículas paramagnéticas (hematita) são atraídas para a superfície das placas, ficando presas. O movimento rotatório leva este material a um ponto onde há um fluxo de água descendente atravessando as placas para a retirada de um produto com características intermediárias (médios), ainda sob a ação do campo magnético. O próximo ponto alcançado já está fora da ação do campo magnético e um novo jato de água faz a retirada do concentrado. Um desenho esquemático desse equipamento é mostrado na figura 3.11 (VIEIRA, 2008).

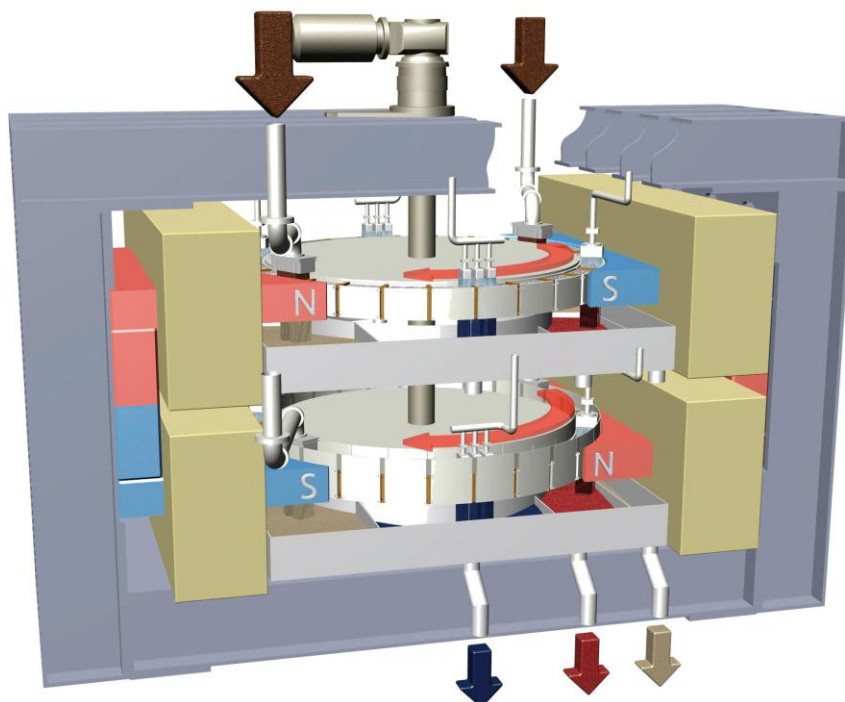


Figura 3.11 - Desenho esquemático de um concentrador eletromagnético de carrossel. Fonte: RIBEIRO, 2010.

Megaprojetos para a produção de minério de ferro voltaram a ser uma realidade recente no mercado mundial. Viabilizados pela demanda mundial crescente, esses projetos focam, na maioria das vezes, jazidas não exploradas pelo baixo teor do mineral. Portanto os Separadores Magnéticos de Alta Intensidade tem cada vez maiores aplicabilidades dentro do beneficiamento mineral devido às características como (RIBEIRO, 2010):

- Alta capacidade de produção;
- Baixo consumo de água e energia elétrica;
- Simplicidade de manutenção;
- Robustez operacional.

A figura 3.13 representa um modelo Bipolar de separador magnético de alta capacidade e alta intensidade. E na figura 3.12 um modelo Tetrapolar.

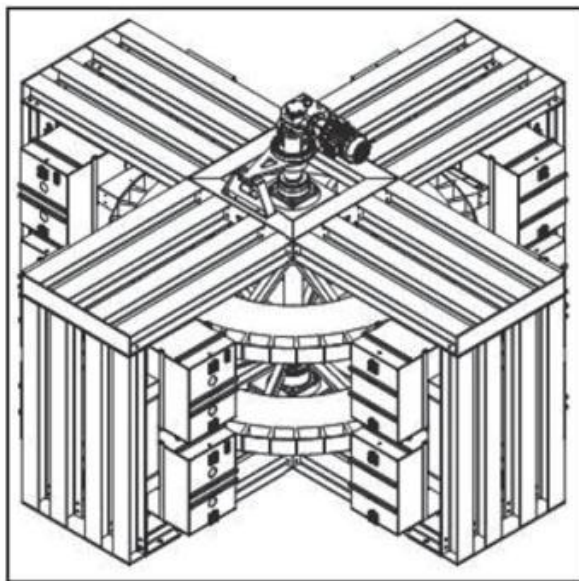


Figura 3.12 - WHIMS Tetrapolar modelo GX-3600. Fonte: RIBEIRO, 2010.

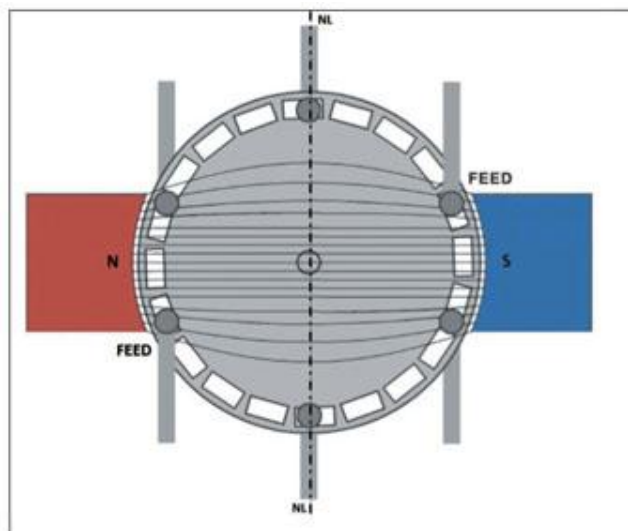


Figura 3.13 - Linha neutra bipolar 2 pontos de alimentação/rotor. Fonte: RIBEIRO, 2010.

A configuração com polaridades alternadas (figura 3.14) cria, pela inversão de polaridade, uma região onde o campo magnético, partindo de um valor máximo na frente de um polo, decresce vetorialmente até zero na direção ortogonal à superfície da placa-matriz. Após atingir o valor zero, tal valor volta a crescer até o valor máximo ao atingir o polo de polaridade oposta. Essa região, chamada de Linha Neutra, permite a descarga do produto magnético (RIBEIRO, 2010).

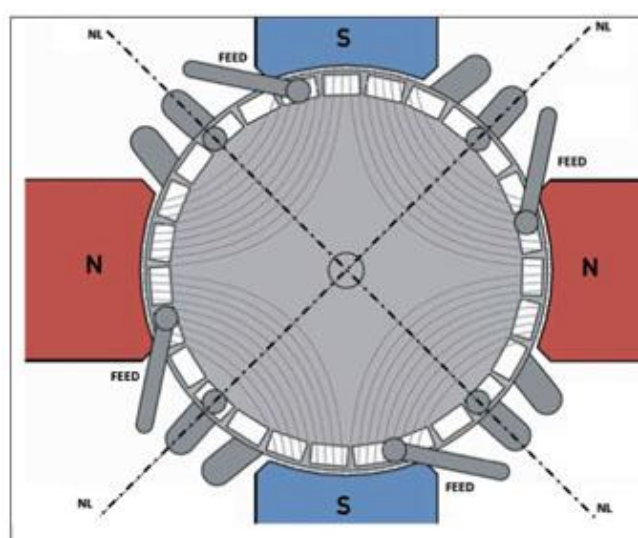


Figura 3.14 Linha neutra Tetrapolar 4 pontos de alimentação/rotor. Fonte: Fonte: RIBEIRO, 2010.

Considerando que cada polo magnético corresponde a um ponto de alimentação, o modelo Tetrapolar, por possuir o dobro de polos do modelo Bipolar, tem, por consequência, a duplicação dos pontos de alimentação e, por conseguinte, o dobro de capacidade. O equipamento industrial possui dois rotores para maximizar a utilização do circuito fechado do campo magnético cujo fluxo retorna pelos polos que magnetizam o rotor inferior (RIBEIRO, 2010).

Pela observação do percurso das linhas de força magnética (figuras 3.13 e 3.14), percebe-se que o fluxo magnético bipolar é transversal ao rotor, enquanto que, no Modelo Tetrapolar, o fluxo é tangencial, isto é, as linhas de força circulam na periferia do rotor.

Do ponto de vista operacional o modelo bipolar, além do ajuste do campo magnético, diversos parâmetros devem ser levados em conta para o ajuste do processo tais como (RIBEIRO, 2010):

- Abertura do *Gap* das matrizes magnéticas (função da granulometria e das características magnéticas do mineral).
- Velocidade do rotor de 3,0 a 7,0 RPM.
- Taxa de alimentação em t/h.
- Percentual de sólidos na alimentação.
- Pressão de água de lavagem dos médios.
- Pressão de lavagem do concentrado.

Aplicações e capacidades do separador:

- Plantas para concentração magnética.
- Alimentação de circuitos de flotação.
- Moagem em circuito fechado para expurgo dos contaminantes.
- Projetos de alta capacidade que exijam número reduzido de máquinas.
- Aplicação ideal em minérios de baixo teor devido à sua grande capacidade de produção, ao baixo investimento inicial por tonelada alimentada e ao baixo custo operacional.

- Capacidades de alimentação em função da abertura das matrizes em (*Gap*)

A GAUSTEC também fabrica concentradores eletromagnéticos de carrossel. Dentre os modelos comercializados, o GX 3600 (Figura 3.15) é o um dos maior equipamento de sua classe de operação no mercado mundial, com uma capacidade de 150 t/h, para uma matriz de 1,5mm. O equipamento piloto da GAUSTEC é o Minimag, com capacidade de 288 kg/h. Esse equipamento será usado para a concentração do rejeito da flotação mecânica, e também será comparado ao WHC-05S (VIEIRA, 2008).



Figura 3.15 - Separador GX 3600. Fonte: RIBEIRO, 2010.

3.5.2 Separadores Magnéticos Slon

O separador magnético Slon foi projetado especificamente para suprir algumas falhas dos concentradores eletromagnéticos de alta intensidade (WHIMS), como capacidade reduzida para finos, entupimento das matrizes e aprisionamento de partículas não magnéticas. Foi desenvolvido na China e teve a primeira aplicação industrial em 1988.

A aplicação industrial destes equipamentos mostrou que é possível produzir concentrados mais limpos e com alimentação composta de partículas menores que $100\mu\text{m}$. O desenvolvimento desta tecnologia foi conduzido em grande parte pela necessidade de concentrar minérios com teores abaixo de 30% de ferro na China (HEARN e DOBBINS, 2007).

Um campo magnético é gerado dentro da zona de separação. Um carrossel, que gira sobre o seu eixo horizontal, possui matrizes de barras paralelas. A polpa é introduzida na caixa de alimentação e as partículas magnéticas são atraídas para a superfície das barras das matrizes. As partículas não magnéticas são descarregadas na caixa de rejeito, auxiliadas pela gravidade e por uma força de pulsação hidrodinâmica. Após sair da zona de separação, onde o campo magnético é desprezível, as partículas magnéticas são descarregadas na caixa de concentrado (HEARN e DOBBINS, 2007; ZENG e DAHE, 2003). Um desenho esquemático do Slon é mostrado na figura 3.16.

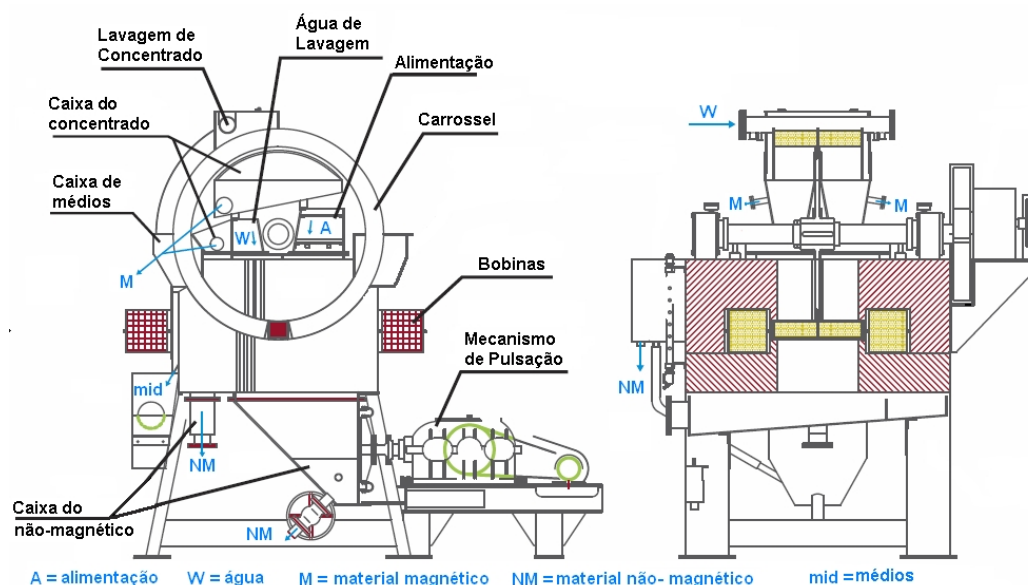


Figura 3.16 - Desenho esquemático do separador Slon. Fonte: ZENG e DAHE, 2003.

Um diafragma atuado por um eixo de manivela é responsável pelo mecanismo de pulsação. Esta pulsação conduz a polpa para cima e para abaixo enquanto está sob a ação da zona de separação, deixando as partículas “mais soltas”, assim menos partículas não magnéticas ficarão aprisionadas na matriz (DAHE, 1998). ZENG e DAHE (2003) comparam o desempenho de um WHIMS-2000 e um Slon- 1500 ambos instalados em paralelo na usina de concentração da Qidashan Mineral. O minério que era alimentado nos dois equipamentos possuía 15,78% de ferro. O Slon- 1500 apresentou um concentrado mais rico, com maior recuperação de ferro que o WHIMS-2000. As diferenças percentuais para teor de ferro no concentrado, recuperação mássica e recuperação de ferro foram, respectivamente, 3,79%, 3,57% e 13,60%. Além disso, o WHIMS tinha como maior problema o entupimento das matrizes. Os autores atribuem o maior teor de ferro no concentrado ao mecanismo de pulsação do Slon e atribui a maior recuperação de ferro ao fato da matriz magnética do Slon estar sempre limpa.

3.6 Inovação em Separador Magnético modelo Hexapolar

O Separador Magnético GHX-1400 (Figuras 3.17 e 3.18), bateu o recorde do equipamento GX-800, como o maior Separador Magnético do mundo em capacidade de alimentação. O Separador Magnético GHX-1400 é um equipamento do tipo WHIMS (*Wet High Intensity Magnetic Separator*), utilizado na separação ou concentração de materiais com diferentes respostas magnéticas. Dimensionado para serviço extrapesado, destaca-se no mercado pelos seus avanços tecnológicos.



Figura 3.17 - Separador GHX 1400. Fonte: GAUSTEC, 2014.



Figura 3.18 - Separador GHX 1400. Fonte: GAUSTEC, 2014.

O GHX-1400 pode ser utilizado em processos nos quais o material magnético é o produto final a ser obtido, como por exemplo, o minério de ferro, ilmenita, minérios de cromo, manganês, tungstênio, zinco, níquel, tântalo, nióbio, molibdênio, dentre outros. Alternativamente, o GHX-1400 pode ser utilizado para a remoção de impurezas no caso em que o material não magnético é o produto desejado, por exemplo, areia, talco, caulim, grafite, bauxita cassiterita, dentre outros.

3.6.1 Características do GHX-1400

Bobinas de Alta Tecnologia

Economia de energia elétrica:

- Até 50% em relação aos equipamentos existentes no mercado (para o mesmo campo magnético).

Refrigeração a ar com estabilidade magnética:

- Manutenção simples sem uso de água.

- O campo magnético permanece constante no valor ajustado para o processo (*Current Closed Loop Control*).

A figura 3.19 demonstra o consumo de energia em função da necessidade do campo magnético e do *Gap* exigido.

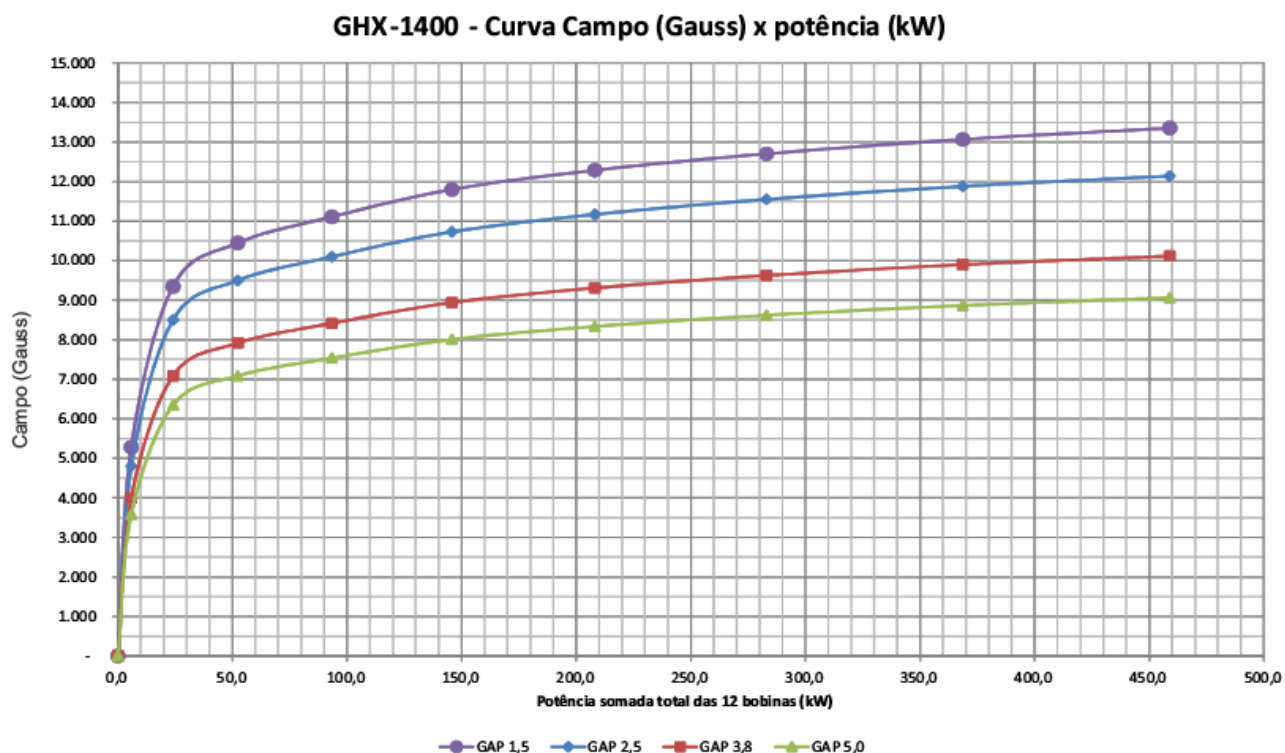


Figura 3.19 - Campo Magnético X Potência Elétrica. Fonte: GAUSTEC, 2014.

Economia de água

- Na lavagem dos médios.
- Não utiliza água para refrigeração das bobinas.

Inovações nas características construtivas

- 12 pontos de alimentação por equipamento (6 pontos de alimentação por rotor).
- 12 bobinas eletromagnéticas (6 por rotor - hexapolar).
- Disposição das bobinas em hexágono.

Facilidade de manutenção

- Maior espaço para manutenção e operação (particularmente entre os rotores).
- Sistema de lubrificação centralizado e elétrico.
- Sistema de refrigeração das bobinas a óleo ou a ar, de acordo com a conveniência do cliente.
- Instrumentação de campo (sensores de temperatura, pressão) em 4-20mA ou alternativamente em *Fieldbus*.

Facilidade de operação e processo

- Alimentação equalizada por meio de caixas de alimentação com controle individual de vazão.
- Equipamento fornecido com filtro para água de processo.
- Velocidade dos rotores ajustável de 2 a 4 RPM por meio de inversor de frequências.
- Dois conversores CA/CC para alimentação independente das bobinas dos rotores superiores e dos rotores inferiores, permitindo a realização de etapas de processo diferentes (*rougher + cleaner, rougher + scavenger*) simultaneamente no mesmo equipamento (Opcional).
- Campo Magnético ajustado permanece estável mesmo com variação da temperatura ambiente e das bobinas (*Current feedback in Closed loop control*).

Redução de investimentos e custos

- Melhor relação investimento / tonelada de alimentação do mercado.
- Reduzida área ocupada para as instalações.
- Baixos custos operacionais.

Atualmente, esse equipamento GHX1400 opera na mina de Itaminas, com uma taxa de alimentação de 480 t/h, processando em três estágios (*Rougher; Cleaner; and Re-Cleaner*) com uma matriz de minério de ferro de 2,5 mm, atingindo um concentrado de 65% Fe, tendo média de rejeito de 35%.

4. CONCLUSÕES

A definição detalhada das variáveis operacionais para o processo de separação magnética não é trivial, uma vez que as mesmas estão ligadas ao tipo de separador ou ao próprio método de separação. De um modo geral, não existe um conjunto genérico de variáveis que permita o controle operacional da separação magnética. Por exemplo, as variáveis empregadas no controle da separação magnética a úmido de alta intensidade não são as mesmas que controlam a separação magnética a seco de alta intensidade. Por essas e outras razões, estas informações limitam-se a comentar algumas variáveis que afetam o desenvolvimento do processo de separação.

Quanto à definição do ideal separador magnético que irá compor o circuito de processamento mineral, deve-se realizar um estudo da característica mineralógica do elemento de interesse a partir dessa informação, definir o equipamento que mais atenderá a planta de beneficiamento, visando obter a qualidade e produtividade do minério de ferro.

O custo de implantação de uma rota de separação magnética é cinco vezes maior em relação ao custo de implantação de uma rota de concentração que utiliza a flotação. Mas deve-se ressaltar que os custos operacionais da separação magnética é três vezes menor que o custo da flotação. Assim deve-se avaliar o período de utilização da planta, pois ao se considerar períodos superiores a 10 anos a opção de se adotar a separação magnética passa a ser mais viável.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, L. R. **Malhas de Controle Típicas no Beneficiamento a Úmido de Minério de Ferro**. 2010. 51f. Monografia (Pós-graduação em Engenharia Mineral) – Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

DAHE, X. (1998) **New technology of SLon vertical ring and pulsating high gradiente magnetic separators**, International Journal of Mineral Processing, 54, p.111-127.

GAUSTEC **GHX - 1400** (2014)

Disponível em: < <http://gaustec.com.br/produtos/ghx1400/>>

HEARN, S. B.; DOBBINS, M. N. (2007) **Slon magnetic separator: A new approach for recovering and concentrating iron ore fines**. Montreal Energy & Mines, Montreal.

IMBRAS, Separador Magnético **WDRE**.

Disponível em: < <http://www.inbras.com.br/produtosDetalhes.asp?codigo=76>>

LUZ, J. A. M. da. **Parametrização de Separação Magnética de Alto Gradiente** (Projeto de pesquisa para a Chamada CNPq: Produtividade em Pesquisa 2010). Ouro Preto, 2010. 16 p.

LUZ, A. B. da; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S. L. M. de. **Tratamento de Minério**. 4ªed. Rio de Janeiro: CETEM-MCT, 2004. 305-335p.

METSO, Separador Magnético **HGMS**.

Disponível em: <[http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/630ACBA03857408EC22577F800392273/\\$File/HGMS_EN.pdf](http://www.metso.com/miningandconstruction/MaTobox7.nsf/DocsByID/630ACBA03857408EC22577F800392273/$File/HGMS_EN.pdf)>

RIBEIRO, J.P; RIBEIRO, C.H.T. **GX-3600: o maior separador magnético do mundo - até 800 t/h**. Revista da Escola de Minas, Ouro Preto, 691-694, out. dez. 2010.

SILVA, F.G.S. **Estudo da Recuperação de Metais Presentes na Escória de Aço Inox Fina por Beneficiamento Magnético**. Porto Alegre. Escola de Engenharia da UFGS, 2008. 30-55p. (Tese, Doutorado, Tecnologia Mineral).

STEINERT (2012) **Catálogo XXIII Simpósio Minério – Metalúrgico da UFMG**.

SVOBODA, J. et al. **Recent developments in magnetic methods of material separation**. Minerals Engineering 2003, Volume 16: páginas 785-792 – Elsevier.

VIEIRA. M.G, **Produção de um *pellet feed* a partir da concentração do rejeito da flotação mecânica da SAMARCO**; Belo Horizonte; Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas; UFMG; 2008; 26-27p; (Dissertação, Mestrado, Tecnologia Mineral).

ZENG, W.; DAHE, X. (2003) **The latest application of Slon vertical ring and pulsating high-gradient magnetic separator**, Minerals Engineering, n.16, p.563-565.