

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

**MONOGRAFIA**

**Estudo Comparativo Entre os Separadores Magnéticos Jones e o Vertical Pulsante  
de Alto Gradiente**

**Aluno: Matheus Conrado Costa**

**Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Rísia Magriotis Papini**

**Mai 2014**

**Matheus Conrado Costa**

**Estudo Comparativo Entre os Separadores Magnéticos Jones e o Vertical Pulsante  
de Alto Gradiente**

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

**Área de concentração:** Processamento de Minérios de Ferro.

**Professora orientadora:** Rísia Magriotis Papini.

**Belo Horizonte  
Universidade Federal de Minas Gerais  
Maio 2014**

C837e Costa, Matheus Conrado.  
Estudo comparativo entre os separadores magnéticos Jones e o vertical pulsante de alto gradiente [manuscrito] / Matheus Conrado Costa. – 2014.  
39 f., enc.: il.

Orientadora: Rísia Magriotis Papini.

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

Bibliografia: f. 38-39.

1. Minas e recursos minerais. 2. 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 Professora Rísia Magriotis Papini, minha orientadora, por sua atenção durante a elaboração deste trabalho.
- Aos membros da Banca Examinadora, pela leitura do texto e pelas sugestões oferecidas ao trabalho.
- A minha namorada Marina que muito me apoiou ao longo do curso e da elaboração deste trabalho.
- Ao meu irmão, por todo incentivo.
- Aos amigos e amigas que não foram citados e que sempre estiveram comigo me auxiliando.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA.....</b>	<b>12</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>13</b>
3.1. Princípios da Separação Magnética .....	13
3.2. Separador Magnético Tipo Jones.....	15
3.3. Separador Magnético Tipo SLon (Separador magnético vertical pulsante de alto gradiente).....	20
3.4 Aplicações.....	24
3.4.1 Aplicação na recuperação de lamas .....	24
3.4.2 Aplicação na recuperação minério de ferro.....	25
3.5 Comparação Entre os Separadores Magnéticos Tipo Jones e SLon.....	30
3.5.1 Sistema de Matrizes .....	30
<b>4 CONCLUSÕES .....</b>	<b>36</b>
<b>5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>37</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>38</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Métodos de concentração magnética de minérios de ferro: faixas granulométricas de melhor aplicação. Fonte: Roberto, 2010 (Modificado).....	15
Figura 2: Separador Magnético Jones. Fonte: Araujo, 2010 (Modificado).....	16
Figura 3: Vista em perspectiva de um separador Jones. Fonte: Svoboda, 2004. ....	17
Figura 4: Separador magnético G-3600. Fonte Gaustec, 2011.....	18
Figura 5: WHIMS Tetrapolar Modelo GX-3600. Fonte: Ribeiro, 2010. ....	18
Figura 6: SLon. Fonte: Outotec, 2013 (Modificado).....	21
Figura 7: Princípio de funcionamento do SLon. Fonte: Outotec, 2013 (Modificado). ..	21
Figura 8: Efeitos da variação de frequência no mecanismo de pulsação. Fonte: Outotec, 2013 (Modificado).....	22
Figura 9: Planta de Gong Changeling. Fonte: Dahe, 1996 (Modificado).....	26
Figura 10: Diferença entre o sistema de matrizes WHIMS E SLon. Fonte: Outotec, 2013 (Modificado).....	32
Figura 11: Planta de Diao Juntai. Dahe, 2007 (Modificado).....	33
Figura 12: Fluxograma da nova rota de concentração do minério da mina de Fábrica para melhora da qualidade do <i>Pellet Feed</i> . Fonte: Santos, 2009.....	34

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Capacidade de alimentação (t/h). Fonte: Gaustec, 2011 (Modificada). .....	20
Tabela 2: Especificações dos separadores SLon. Fonte: Outotec, 2013. ....	23
Tabela 3: Teste com Concentrador Magnético – Rejeito Final das Espirais de Água Limpa. Fonte Oliveira, 2010 (Modificado) .....	25
Tabela 4: Resultados médios dos testes comparativos. Fonte: Dahe, 1996. ....	27
Tabela 5: Comparação da Operação. Fonte: Fonte: Dahe, 1996. ....	27
Tabela 6: Resultados comparativos entre SLon-1500 x WHIMS-200. Fonte: Zeng e Dahe, 2003. ....	28
Tabela 7: Aplicação da separação/concentração magnética nas principais minas de ferro do Brasil, Fonte: Santos (2010) apod. Oliveira (2006) .....	29
Tabela 8: Comparação do consumo de eletricidade. Fonte: Dahe, 1996. ....	30
Tabela 9: Relação entre tamanho da haste e tamanho da maior partícula na Matriz. Fonte: Outotec, 2013. ....	31

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{B}$  = Densidade Magnética.

$\vec{H}$  = Força de Magnetização.

$\mu$  = Permeabilidade Magnética do Meio.

$\vec{\Psi}$  = Indução magnética do material.

$\vec{J}$  = Magnetização de um material.

$k$  = Susceptibilidade magnética.

$\pi$  = Pi.

T = Tesla.

## **RESUMO**

O objetivo deste trabalho foi comparar os separadores magnéticos Jones e SLon, bem como explicar os princípios da separação magnética de minérios e apresentar o princípio de funcionamento dos separadores. Os separadores magnéticos utilizam das propriedades magnéticas presentes nos minerais para classificá-los de acordo com sua susceptibilidade magnética em ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos. A aplicação dos separadores na recuperação minerais magnéticos contidos em lamas e sua utilização em plantas de tratamento de minérios de ferro é abordada através de casos extraídos da bibliografia. Na comparação entre os separadores magnéticos tem seu foco nos sistemas de matrizes pois verificou-se com base nos trabalhos estudados que os separadores SLon e Jones tem-se como principal diferença o sistema de matrizes, onde destacam-se os problemas de entupimento dos separadores Jones e o sistema de matrizes vinculado a pulsação do SLon.

## **ABSTRACT**

The objective of this study was to compare magnetic separators Jones and SLon as well as explain the principles of magnetic separation of minerals and present the working principle of the tabs. Magnetic separators utilize the magnetic properties present in minerals to classify them according to their magnetic susceptibility in ferromagnetic, paramagnetic and diamagnetic. The application of magnetic separators in mineral recovery contained in sludge and its use in treatment plants iron ore is approached through cases extracted from the literature. In comparing the magnetic separators focuses on matrix systems since it was found based on the work that studied SLon and Jones tabs has as main difference the system matrices, which highlight the problems of clogging Jones tabs and the system matrices linked to heartbeat SLon.

## 1. INTRODUÇÃO

A separação magnética é um processo de concentração de minérios que se utiliza das propriedades magnéticas dos minerais presentes nos minérios para classificá-los. Os minerais magnéticos são classificados de acordo com sua susceptibilidade magnética em ferromagnéticos, paramagnéticos e diamagnéticos.

Os equipamentos de separação magnética inicialmente concebidos utilizavam campos magnéticos de baixa intensidade e com o passar dos anos e evolução da tecnologia foram surgindo equipamentos com campos magnéticos que podem ser fixos ou variados e cada vez mais elevados, com o auxílio do sistema de matrizes.

Separadores magnéticos são utilizados principalmente para concentração de hematita, manganês, titânio e outros minerais magnéticos fracos bem como para a purificação de caulim, zircônio, quartzo, feldspato e outros materiais não magnéticos.

Os separadores magnéticos de alta intensidade a úmido (WHIMS) são largamente utilizados no processo de concentração de minérios de ferro. Nos últimos anos surgiu na China um novo equipamento que junta a jigagem ao processo de separação magnética, o separador magnético vertical pulsante de alto gradiente (VPHGMS), comumente chamado de SLon.

Como estes equipamentos podem ser utilizados em classes granulométricas semelhantes, é de grande importância um estudo que possa definir a aplicabilidade de cada um dos modelos, destacando suas características principais, bem como tentando definir qual o mais adequado a cada faixa granulométrica tendo em vista que ambos trabalham em faixas granulométricas entre 0,01 mm e 1 mm aproximadamente.

Com a exploração de jazidas de minérios de ferro com teores cada vez mais baixos e as crescentes demandas de mercado, a utilização de métodos de concentração magnéticos tende a ser cada vez mais aplicada em maiores escalas.

Araujo (2010), destaca a influência dos custos de implantação da uma rota de separação magnética, uma vez que o custo de implantação de separadores é cinco vezes maior que

o custo 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 vantajosa.

## **2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA**

Os objetivos deste trabalho são:

- explicar os princípios da separação magnética de minérios;
- apresentar os separadores magnéticos tipo Jones e SLon;
- comparar estes separadores quanto as suas variáveis.

Existem diferentes tipos de separadores magnéticos, de modo que cada um deles pode ser ajustado para um número limitado de aplicações. A escolha é influenciada por vários fatores, e dependendo da forma como o equipamento está articulado pode-se montar diversos arranjos a serem aplicados a diferentes contextos e materiais. A dimensão das partículas e as propriedades magnéticas do material a ser tratado são as variáveis mais importantes que determinam a escolha da técnica de separação magnética.

Ao se pesquisar a respeito do separador tipo SLon nota-se a ausência de trabalhos que não sejam oriundos da China, portanto é muito importante tratar essas informações de forma que se possa compreender seu funcionamento e assim compará-lo com sistemas mais difundidos e utilizados no Brasil. Observa-se também que há muitos estudos que utilizam da separação magnética para caracterização tecnológica de minérios, mas não se encontram muitos estudos onde a comparação entre métodos de separação magnética seja alvo principal da linha de pesquisa.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Princípios da Separação Magnética

A separação magnética é um método de concentração que utiliza as propriedades magnéticas dos minerais para classifica-los e assim promover sua concentração. A propriedade de um material que determina sua resposta a um campo magnético é chamada de susceptibilidade magnética.

De acordo com essa propriedade os minerais são classificados em duas categorias, os que são atraídos pelo campo magnético e os que são repelidos por ele. Assim os materiais atraídos pelo campo são reclassificados em: ferromagnéticos que são mais fortemente atraídos pelo campo, e os paramagnéticos, que são atraídos fracamente. Os repelidos pelo campo classificam-se como diamagnéticos (LUZ, 2010).

As grandezas vetoriais que atuam no campo magnético são, a densidade magnética  $\vec{B}$ , e intensidade de campo  $\vec{H}$ , de acordo com sistema internacional (SI) são medidas em Tesla (T). Onde  $\vec{B}$  é número de linhas de indução que passam através da partícula do mineral, e  $\vec{H}$  é a força de magnetização que induz a passagem das linhas de indução através da partícula (LUZ, 2010).

Tais grandezas são vetoriais e, portanto, possuem módulo, direção e sentido e estão relacionadas pela Equação (3.1).

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3.1)$$

Onde  $\mu$  é a permeabilidade magnética do meio. No vácuo,  $\mu$  pode ser igual a  $\mu_0$  para fins práticos ( $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7} \text{H.m}^{-1}$ ).

A experiência mostra que, quando se coloca uma partícula mineral fracamente magnética em determinado campo  $\vec{H}$  de uma dada região do espaço, o fluxo magnético  $\vec{B}$  é acrescido do valor  $\vec{\Psi}$  tal que:

$$\vec{B} = \vec{H} + \vec{\Psi} \quad (3.2)$$

$\vec{\Psi}$  = Indução magnética do material.

O seu valor no ar é muito pequeno e, dessa forma, pode-se tomar o valor de  $\vec{B}$  igual a  $\vec{H}$ . É muito comum referir-se apenas à magnetização  $\vec{J}$  de um material, que é a ação de criar linhas de indução magnética ou um campo magnético em uma substância ou em uma região determinada do espaço. A relação entre a indução magnética e a magnetização é expressa por:

$$\vec{\Psi} = 4\pi\vec{J} \quad (3.3)$$

Conclui-se que a Equação (3.2) pode ser escrita da forma:

$$\vec{B} = \vec{H} + 4\pi\vec{J} \quad (3.4)$$

A razão adimensional entre  $\vec{J}$ , magnetização, e  $\vec{H}$ , intensidade de campo, é chamada de susceptibilidade magnética  $k$ , ou seja:

$$k = \vec{J} / \vec{H} \quad (3.5)$$

Para materiais paramagnéticos,  $k$  é uma constante positiva e de baixo valor, não ultrapassando normalmente ao valor de  $10^{-3}$ . Para os materiais diamagnéticos,  $k$  é uma constante negativa, usualmente menor (em módulo) que  $10^{-5}$ . A susceptibilidade magnética de um material ferromagnético é variável e depende do campo de magnetização, da natureza e do manuseio da amostra.

Os materiais ferromagnéticos são, na sua maioria, referenciados em termos da permeabilidade magnética  $\mu$  e, de acordo com a Equação (3.1), tem-se:

$$\mu = \vec{B} / \vec{H} \quad (3.6)$$

Das relações (3.4), (3.5) e (3.6) conclui-se que:

$$\mu = 1 + 4\pi k \quad (3.7)$$

Assim o fenômeno que governa a separação magnética está relacionado ao comportamento das partículas de minerais diferentes, quando expostas a um mesmo campo magnético e às forças magnéticas que atuam sobre elas.

A figura 1, apresenta os métodos magnéticos de concentração de minérios de ferro de acordo com suas faixas granulométricas de melhor aplicação.

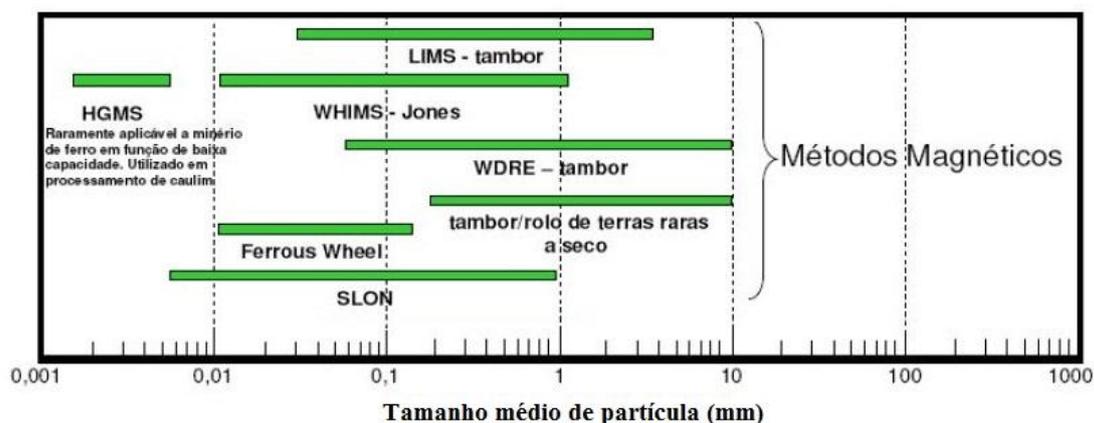


Figura 1: Métodos de concentração magnética de minérios de ferro: faixas granulométricas de melhor aplicação. Fonte: Roberto, 2010 (Modificado).

### 3.2. Separador Magnético Tipo Jones

O separador magnético tipo WHIMS (*wet high intensive magnetic separator*), é um concentrador de via úmida que utiliza um campo magnético de alta intensidade para promover a separação entre minerais magnéticos e não magnéticos. É utilizado para a recuperação de minérios com granulometria inferior a 1,0 mm a um baixo custo operacional.

Araújo (2010) destaca que “dentre esse tipo de equipamento, o Separador Jones é o mais consagrado”, vide figuras 2 e 3.

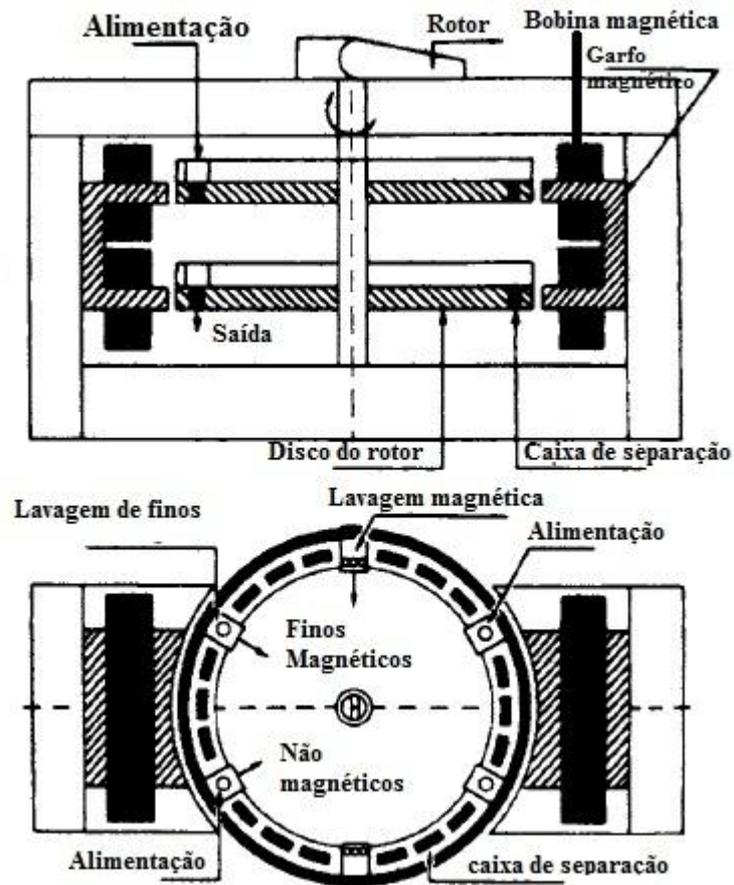
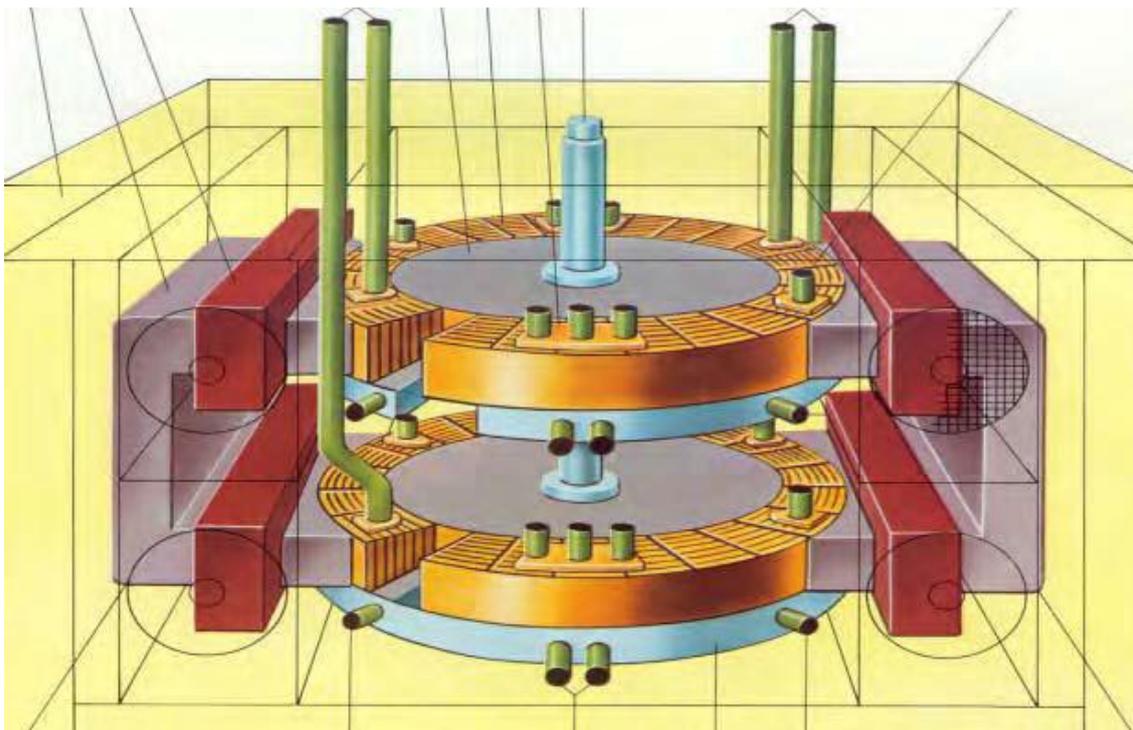


Figura 2: Separador Magnético Jones. Fonte: Araujo, 2010 (Modificado).

Os separadores Jones consistem em grandes estruturas de aço, onde consta um anel rotativo, chamado de carrossel, que atravessa um campo magnético, no qual são instaladas as matrizes, que consistem de barras de aço inox arredondado, as quais formam um conjunto de malhas magnéticas. A alimentação é feita na área onde há a maior intensidade do campo magnético, onde as partículas magnéticas são retidas pela matriz ou arrastadas pelo movimento de rotação do carrossel. Em um setor de campo magnético de menor intensidade é feita a lavagem das matrizes por jatos de água sob pressão para retirar as partículas magnéticas, que são direcionadas a uma calha de coleta. Segundo Araujo (2010), as impurezas retidas nas placas são lavadas, antes da saída do mineral da área sob influência e evitando a retirada de materiais de interesse.



**Figura 3: Vista em perspectiva de um separador Jones. Fonte: Svoboda, 2004.**

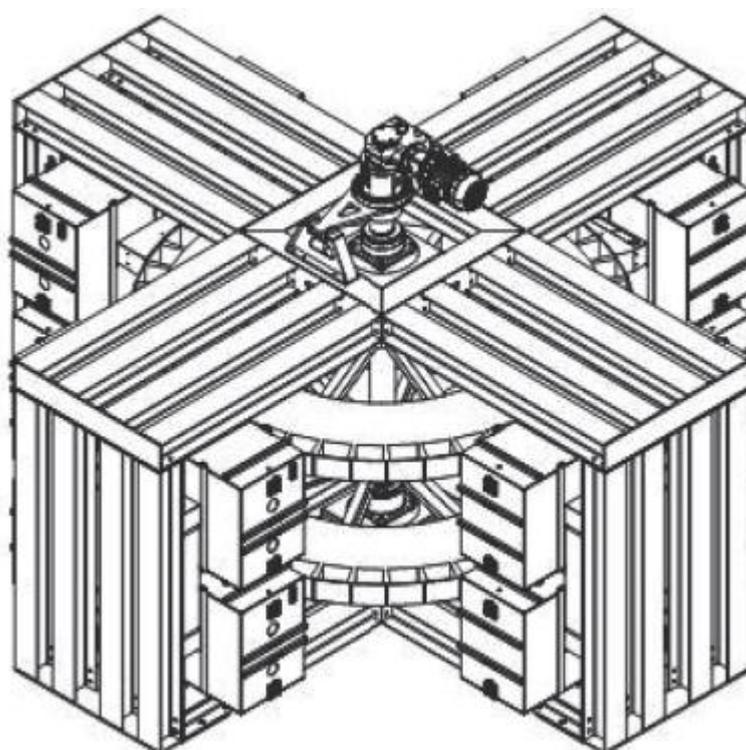
A separação é obtida com seletividade, visto que facilmente se controlam as variáveis operacionais como: intensidade de campo, elemento de conversão de fluxo, taxa de alimentação, percentagem de sólidos na polpa, velocidade do anel rotativo ou rotor e descarga das partículas magnéticas. (LUZ, 210)

A Gaustec produz o separador magnético G-3600 (Figura 4), um equipamento do tipo Jones, utilizado na separação ou concentração de materiais com diferentes respostas magnéticas, dimensionado para serviço extrapesado. Este equipamento apresenta a melhor relação investimento por tonelada de alimentação do mercado, com reduzida área ocupada para as instalações e baixos custos operacionais.



**Figura 4: Separador magnético G-3600. Fonte Gaustec, 2011.**

Partindo do seu modelo bipolar G-3600, consolidado no mercado, desenvolveu o Modelo Tetrapolar GX-3600. Pela inversão de polaridade cria uma região onde o campo magnético, partindo de um valor máximo na frente de um pólo, 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 pólo de polaridade oposta. Essa região, chamada de Linha Neutra, permite a descarga do produto magnético.



**Figura 5: WHIMS Tetrapolar Modelo GX-3600. Fonte: Ribeiro, 2010.**

De acordo com a Gaustec, o G-3600 pode ser utilizado em processos em que o material magnético é o produto final a ser obtido, como por exemplo, minérios de ferro, minérios de cromo, manganês, tungstênio, zinco, níquel, tântalo, nióbio, molibdênio. Podendo ser utilizado também 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.

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

1. Abertura do Gap das matrizes magnéticas (função da granulometria e das características magnéticas do mineral): uma abertura de matriz mal planejada em relação a alimentação pode causar entupimentos e paradas constantes para manutenções;
2. Velocidade do rotor de 3,0 a 7,0 RPM: influência diretamente na taxa de recuperação e produção,
3. Taxa de alimentação em t/h: taxas mais elevadas pioram a qualidade do produto e aumentam o teor de ferro no rejeito reduzindo a eficiência do processo e taxas mais baixas, perde-se capacidade do equipamento sem haver uma melhora substancial na qualidade do produto;
4. Percentual de sólidos na alimentação: afeta a qualidade do material concentrado, polpa muito densa dificulta a separação, por outro lado, polpas muito diluídas reduzem a produtividade, por processar água desnecessariamente;
5. Pressão de água de lavagem dos médios: uma elevada pressão pode ocasionar um aumento de material magnético no rejeito;
6. Pressão de lavagem do concentrado: uma elevada pressão pode levar a redução da qualidade do concentrado final.

Araujo (2010) apresenta 2 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. Já 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.

A tabela 1 apresenta a capacidade de alimentação para os diferentes separadores Jones produzidos pela Gaustec, que variam de acordo com os *Gaps* (aberturas). Os valores são para minério de ferro com 50% de sólidos.

**Tabela 1: Capacidade de alimentação (t/h). Fonte: Gaustec, 2011 (Modificada).**

GAP	1,5 mm	2,5 mm	3,8 mm	5,0 mm
G-3600	180 t/h	240 t/h	350 t/h	400 t/h
GX-800	360 t/h	480 t/h	700 t/h	800 t/h
GX-500	240 t/h	300 t/h	460 t/h	520 t/h
GX-300	120 t/h	160 t/h	240 t/h	280 t/h
GHP-400	180 t/h	240 t/h	350 t/h	400 t/h
GHP-150	120 t/h	150 t/h	240 t/h	260 t/h

### **3.3. Separador Magnético Tipo SLon (Separador magnético vertical pulsante de alto gradiente)**

A alternativa recente para separação magnética são os separadores magnéticos verticais pulsantes de alto gradiente a úmido, que tem origem chinesa. Os separadores magnéticos SLon utilizam os campos de força combinados do magnetismo, fluido pulsante e gravidade para beneficiamento de minerais finos fracamente magnéticos. Eles possuem as vantagens de alta eficiência, baixo custo operacional e alta confiabilidade. (DAHE, 1996). A figura 6 ilustra o separador SLon comercializado pela Outotec no Brasil.

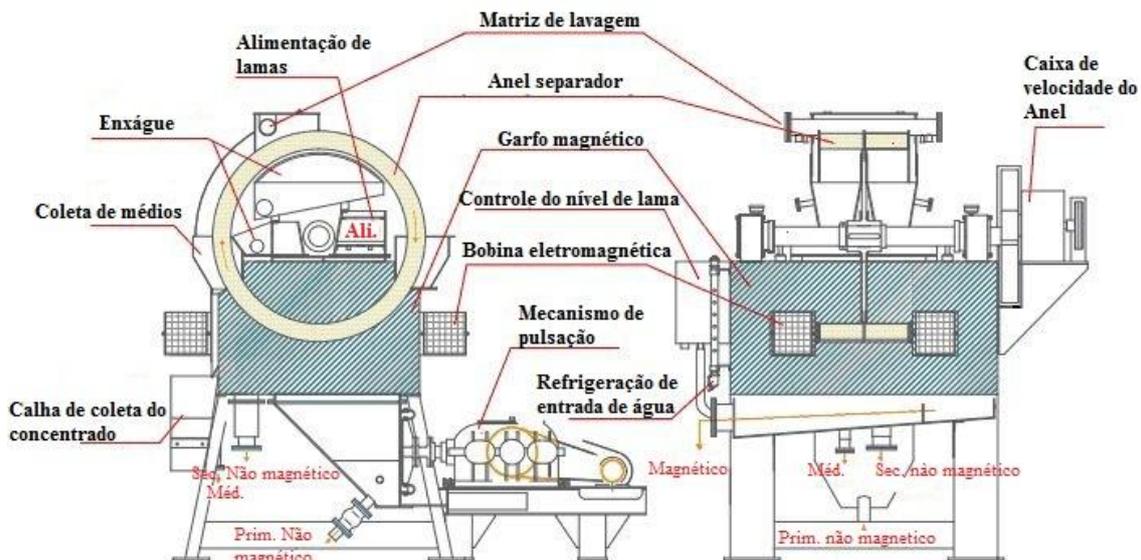


Figura 6: SLon. Fonte: Outotec, 2013 (Modificado).

SLon de alto gradiente possui as vantagens da grande relação de beneficiamento, de alta eficiência de processamento mineral, de alta resistência da matriz ao entupimento, alto rendimento, alta confiabilidade e disponibilidade (DAHE, 2004).

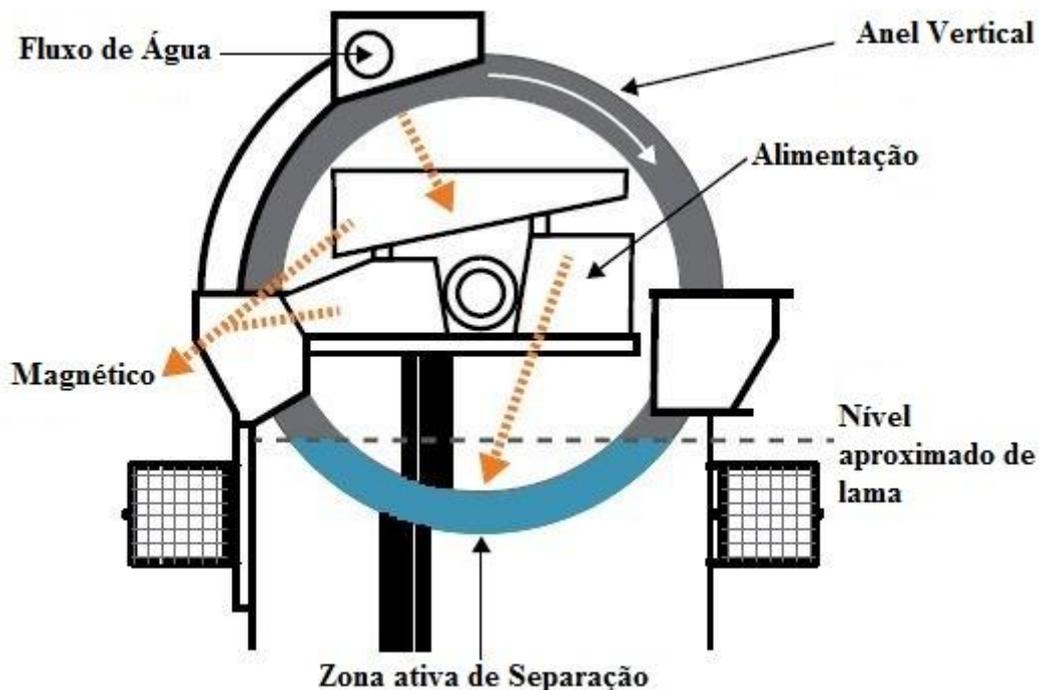
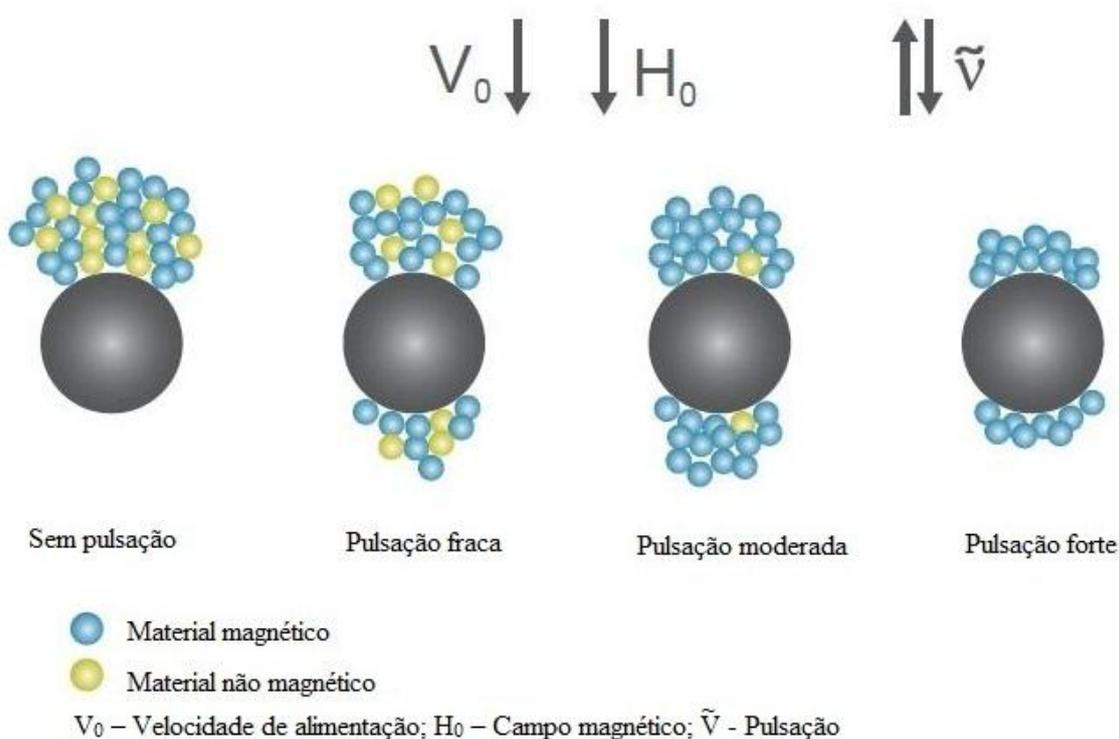


Figura 7: Princípio de funcionamento do SLon. Fonte: Outotec, 2013 (Modificado).

Svoboda (2004) descreve o princípio de funcionamento do equipamento, também ilustrado pela figura 7. O gerador de impulsos induz impulsos verticais na lama no interior

da matriz, as partículas são, assim, expostas à força de pulsação, que é muito maior do que a força de gravidade e atua em ambas as direções. Pela pulsação as partículas não-magnéticas em suspensão são removidos mecanicamente da matriz, o que resulta no melhoramento da qualidade do concentrado magnético. Ao mesmo tempo, a pulsação permite que as partículas magnéticas na suspensão passem a ser expostas a toda a profundidade da matriz, o que aumenta a recuperação do componente magnético.

O mecanismo de pulsação do SLon funciona através um diafragma acionado que proporciona pulsação na zona de separação para auxiliar o desempenho de separação. Com a agitação da lama mantem-se as partículas mais livres, minimizando o aprisionamento. Este mecanismo também maximiza a acumulação de partículas em todos os lados da matriz, criando uma maior área de superfície para a coleta, como pode ser visto na figura 8.



**Figura 8: Efeitos da variação de frequência no mecanismo de pulsação. Fonte: Outotec, 2013 (Modificado).**

Outro benefício é reduzir o impulso da partícula, o que ajuda a captura das partículas pela força magnética aplicada e promove a retirada das partículas não magnéticas da matriz. Efeitos que o tornam mais eficiente e aumentam sua capacidade de produção.

A tabela 2 apresenta as especificações dos separadores SLon produzidos pela Outotec.

Tabela 2: Especificações dos separadores SLon. Fonte: Outotec, 2013.

Especificações modelos	100 (lab.)	500 (Escala piloto)	750 (Escala piloto)	750II (Industrial)	1000 (Industrial)	1250 (Industrial)	1500 (Industrial)	1750 (Industrial)	2000 (Industrial)	2500 (Industrial)	3000 (Industrial)	4000 (Industrial)
<b>Diâmetro do Anel (mm)</b>	n/a	500	750	750	1000	1250	1500	1750	2000	2500	3000	4000
<b>Capacidade, a seco (nominal)(tph)</b>	Lote	0,03-0,13	0,06-0,25	2-4	4-6	6-16	15-27	25-45	45-70	70-125	125-225	225-450
<b>Taxe de transferência de suspensão (nominal)(m<sup>3</sup>/h)</b>	n/a	0,25-0,50	0,5-1,0	5-10	10-20	20-50	50-100	75-150	100-200	200-400	350-650	550-1050
<b>Concentração da alimentação (ty p.)(%)</b>	n/a	10-40	10-40	10-40	10-40	10-40	10-40	10-40	10-40	10-40	10-40	10-40
<b>Força de campo disponíveis (T)</b>	1,2 e 1,7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0e1,3	1,0e1,3	0,6, 1,0 e 1,3	0,6, 1,0 e 1,3	0,6, 1,0 e 1,3	1,0	1,0
<b>Retificador de potência instalada (ty p.)(kVA)</b>	31	31	31	31	30	55	69	70	75	94	133	158
<b>Potência do motor (ty p.)(kW)</b>	0,75	0,74	1,3	2,25	3,3	3,7	7	8	13	22	37	74
<b>Volume de água de descarga (m<sup>3</sup>/h)</b>	Lote	0,75-1,5	1,5-2,5	5-8	10-20	30-45	60-90	80-120	100-150	200-300	250-530	600-1200
<b>Volume de água de refrigeração (m<sup>3</sup>/h)</b>	4	4	5	4	5	6	8	11	12	15	20	24
<b>Peso Total (kg)</b>	1100	1500	3000	4000	6000	14000	20000	35000	50000	105000	175000	398000
<b>Dimensões (CxLxA)(mm)</b>	1600 800 1600	1800 1400 1320	2000 1360 1680	2250 1700 1680	2700 2000 2400	3200 2340 2700	3600 2900 3200	3900 3300 3800	4200 3550 4200	5800 5000 5400	6600 5300 6400	8000 6000 7400

### 3.4 Aplicações

#### 3.4.1 Aplicação na recuperação de lamas

Uma das aplicações da separação magnética é recuperação de hematita contida em lamas espessadas, Silva e Luz (2013) apresentam um estudo onde foi comparada a ação dos separadores Jones e SLon em escala piloto onde foi simulado um circuito de esgotamento, seguido de limpeza do concentrado.

O material utilizado nos ensaios foi o *underflow* do espessador de uma usina de tratamento de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero, onde o principal contaminante a sílica, encontra-se totalmente livre de minerais de ferro (SILVA e LUZ, 2013).

Os resultados apontaram que a melhor recuperação foi obtida com a utilização do separador tipo Jones que permitirá a adoção de uma planta típica recebendo 2,5 Mt / ano de *run of mine* com um teor de ferro de 45%, a recuperação metalúrgica foi de 82%, e produção de 1,6 Mt de concentrado por ano. Foi alcançada eficiência operacional de 85% para o tratamento de 20 t / h de *underflow* do espessador.

Oliveira (2010) apresenta um estudo da implantação de uma etapa de concentração magnética nos rejeitos das espirais, com o intuito de aumentar a recuperação metalúrgica do minério de ferro na Usina da Mina de Água Limpa.

Foram realizados seis testes, apresentados na tabela 3, onde se variava a intensidade do campo magnético e pressão da água de lavagem. O teste 3 apresentou a melhor recuperação metalúrgica e melhor recuperação em massa.

A utilização de um separador magnético proporciona um concentrado que dá para ser blendado ou se tornar um novo produto. Uma vez que houve redução dos teores de ferro do rejeito, que baixaram de 20 % ferro para 3% ferro, obtendo otimização da reserva e aumento da vida útil das pilhas de estéril.

**Tabela 3: Teste com Concentrador Magnético – Rejeito Final das Espirais de Água Limpa. Fonte Oliveira, 2010 (Modificado)**

Teste	Campo (Gauss)	Água (ml/10s)	Massa (g)	R.M. (%)	Fe (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	P (%)	Rec. Met. (%)
1	3000	500	116,7	100,0	21,04	68,69	0,32	0,02	56,0
			21,9	18,8	63,0	9,19	0,41	0,02	
			94,8	81,2	11,38	82,47	0,30	0,02	
2	3000	1000	231,1	100,0	19,71	70,41	0,29	0,01	38,0
			27,5	11,9	63,0	8,51	0,38	0,02	
			203,6	88,1	13,84	78,77	0,28	0,01	
3	6000	500	202,6	100	21,23	68,52	0,31	0,02	93,0
			66,6	32,9	60,0	12,82	0,50	0,02	
			136,0	67,1	2,19	95,83	0,21	0,01	
4	6000	1000	195,9	100,0	20,39	69,97	0,31	0,02	83,0
			53,3	27,2	62,0	10,09	0,49	0,02	
			142,6	72,8	4,86	92,34	0,24	0,01	
5	6000	1500	199,9	100,0	20,72	69,50	0,29	0,02	87,0
			57,8	28,9	62,0	10,06	0,48	0,02	
			142,1	71,1	3,92	93,67	0,22	0,01	
6	6000	2000	211,6	100,0	20,73	69,76	0,28	0,01	87,0
			61,7	29,2	62,0	9,99	0,47	0,02	
			149,9	70,8	3,67	94,42	0,20	0,01	

#### 3.4.2 Aplicação na recuperação minério de ferro

A utilização de separadores SLon em plantas de tratamento de minérios de ferro é bem difundida na China, onde já vem sendo utilizado em mais de 30 usinas de tratamento. Pode-se destacar dois grandes sucessos de utilização do SLon.

O primeiro é um caso apresentado por Dahe (1996), da Gong Changeling Mineral Processing Plant of Anshan Iron and Steel Company, que trabalha com teores de ferro muito baixos e com um minério contendo principalmente magnetita, maghemita e hematita associados ao quartzo e outros minerais de ganga (Figura 9).

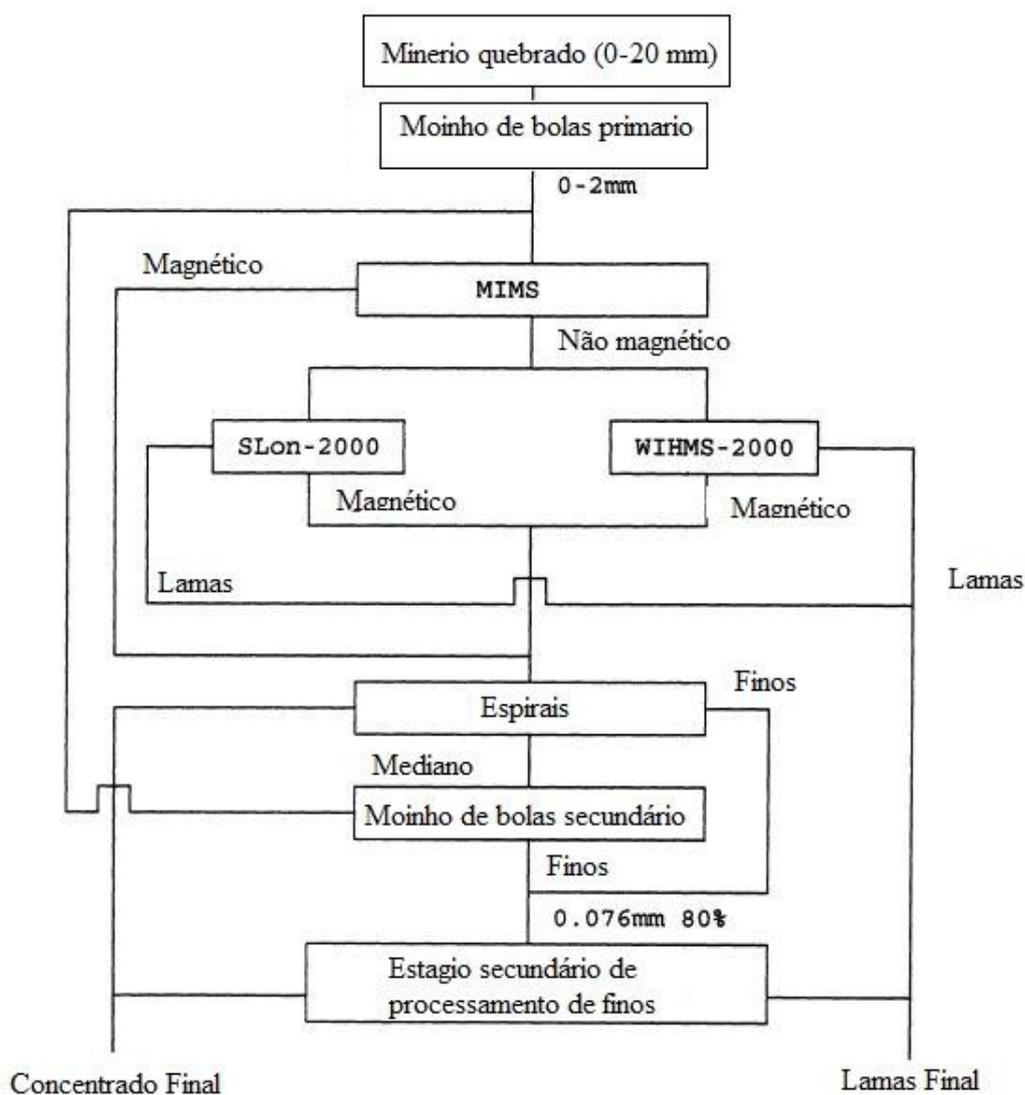


Figura 9: Planta de Gong Changeling. Fonte: Dahe, 1996 (Modificado).

No circuito de tratamento eram utilizados na recuperação do ferro 5 separadores magnéticos WHIMS-2000 com matriz de abertura de 2 mm, que causavam sempre entupimentos com partículas mais grossas, exigindo sempre muita manutenção. Na intenção de solucionar estes problemas com entupimento das matrizes, seriam feitos testes em paralelo com o SLon-2000 buscando eliminar os problemas de entupimento e melhorar a recuperação de ferro. Os resultados estão expostos nas tabelas 4 e 5.

**Tabela 4: Resultados médios dos testes comparativos. Fonte: Dahe, 1996.**

Separador	Taxa (Fe %)			Massa de concentrado (%)	Recuperação de ferro (%)
	Alimentação	Concentrado	Lamas		
SLon-2000	25,94	41,21	10,74	49,89	79,25
WHIMS-2000	25,94	34,00	16,15	54,85	71,89
Diferença	0	7,21	-5,41	-4,96	7,36

**Tabela 5: Comparação da Operação. Fonte: Fonte: Dahe, 1996.**

Separador	Tempo (h)	Tempo de trabalho Moinho de Bolas (h)	Operação	Taxa de Operação	Problemas na Matriz e anel	Outros Problemas
SLon-2000	4344	4270	4220	98,8	0	50
WHIMS-2000	4344	4270	3351	78,5	793	126
Diferença	0	0	+869	+20,3	-793	-76

Dahe mostra que o separador SLon pode atingir um grau de recuperação muito mais elevado para o concentrado, tem uma taxa de operação maior e não apresenta problemas de entupimento. Isso ocorre principalmente devido ao fato que a matriz é mantida sempre limpa através da pulsação e que a força magnética sobre as partículas minerais de ferro é mais forte. Segundo Dahe o consumo de água e energia dos dois separadores foi semelhante.

O Segundo caso é o da Qidashan Mineral Processing Plant, apresentado por Zeng e Dahe (2003), que processa 8 milhões de toneladas de minério de ferro por ano, onde hematita, magnetita e limonita são os principais minerais de ferro.

A planta de processamento é dividida em duas linhas, a linha 1 onde a fração fina é processada e o fluxograma diretor consiste de moagem, separação por gravidade, separação magnética e flotação. O concentrado final de ferro pode chegar a 66% Fe. A fração grossa é processado através da produção linha 2, o fluxograma original era: moagem, separação magnética de baixa intensidade (LIMS). No entanto, o concentrado final de ferro só poderia atingir 63% Fe, e não poderia atender aos requisitos metalúrgicos.

Para solucionar os problemas da linhas 2, está passou a operar de acordo com a linha 1 que utilizavam cinco separadores magnéticos tipo WHIMS-2000 que sempre apresentavam entupimento. Assim um SLon-1500 foi instalado em paralelo com os cinco WHIMS-2000 para processar os mesmos minerais. Devido ao seu excelente desempenho (Tabela 6), o fluxograma de processamento de linha de produção 2 foi reformado, com dez separadores SLon-1750.

**Tabela 6: Resultados comparativos entre SLon-1500 x WHIMS-200. Fonte: Zeng e Dahe, 2003.**

Separador	Taxa (Fe %)			Massa do concentrado (%)	Recuperação de ferro (%)
	Alimentação	Concentrado	Lamas		
SLon-1500	15,78	30,06	9,10	31,87	60,71
WHIMS-2000	15,78	26,27	11,64	28,30	47,11
Diferença	0	3,79	-2,54	3,57	13,60

O separador Jones é utilizado em larga escala no Brasil, em processos de concentração e recuperação de minério de ferro. Santos (2010) mostra na tabela 7 as minas da empresa Vale onde são aplicadas a separação magnética.

Na concentração de minérios, a principal aplicação da separação magnética a úmido de alta intensidade, é feita em Itabira (MG-BR), onde são usados separadores de carrossel, tipo Jones, na concentração de hematita. O uso desse tipo de separador, no início dos anos 70, permitiu viabilizar o aproveitamento de itabiritos, que até então não eram considerados minério de ferro.

**Tabela 7: Aplicação da separação/concentração magnética nas principais minas de ferro do Brasil, Fonte: Santos (2010) apod. Oliveira (2006)**

Mina Empresa	Equipamento	Granul. Alim. (mm)	Campo Magnético (Gauss)	Nº Equip. Estágio Rougher	Nº Equip. Estágio Cleaner	Nº Equip. Estágio Scavenger
Cauê Vale	Jones DP317 Sinter Feed	-1,00 +0,15	9000	-	5	5
Cauê Vale	Jones DP317 Pellet Feed	-0,15	9000	18	-	-
Conceição Vale	Jones DP317 Sinter Feed	-1,00 +0,15	9000	-	6	-
Conceição Vale	Jones DP317 Pellet Feed	-0,15	9000	12	-	-
Timbopéba Vale	WDRE	-1,00	6000	6	-	-
Fábrica Vale	Jones DP317 Pellet Feed	-1,00	9000	-	5	7
Feijão Vale	Jones DP317 Pellet Feed	-1,00	9000	-	2	-
Brucutu Vale	WDRE	-1,00 +0,15	6000	9	-	-
Brucutu Vale	Jones SHP3200 Sinter Feed	-1,00 +0,15	9000	-	12	8
Alegria Vale	WDRE	-1,00 +0,15	6000	4	-	-
Alegria Vale	Jones DP317 Sinter Feed	-1,00 +0,15	9000	-	4	2
Mutuca Vale	Ferrous Wheel	-0,15	2400	5	-	-
Jangada Vale	WDRE	-1,00 +0,15	6000	2	-	-
Jangada Vale	Ferrous Wheel	-0,15	2400	2	-	-
Pico Vale	WDRE	-1,00 +0,15	6000	4	-	-
Pico Vale	WHC Eries/Inbrás	-1,00 +0,15	15000	-	6	3

### 3.5 Comparação Entre os Separadores Magnéticos Tipo Jones e SLon

Apesar de apresentarem algumas distinções podem ser feitas algumas comparações entre os dois tipos de separadores magnéticos, na tabela 8 Dahe (1996), faz uma comparação entre o consumo energético dos separadores Jones e SLon.

**Tabela 8: Comparação do consumo de eletricidade. Fonte: Dahe, 1996.**

Separador		Potência instalada (Kw)	Potência medida (Kw)	Unidade de consumo de energia (Kwh/t)
SLon-2000	Energização	82	41,6	0,86
	Condução	5,5+7,5	4,1+5,6	
	Total	95	51,3	
WHIMS-2000	Energização	52	26	1,12
	Condução	25	18,8	
	Total	77	44,8	
Diferença		+18	+6,5	-0,26

#### 3.5.1 Sistema de Matrizes

A avaliação entre os sistemas de matrizes utilizado nos equipamentos de separação magnética é muito importante, pois afetam diretamente as taxas de recuperação. Um sistema de matrizes bem elaborado pode apresentar grandes vantagens, uma vez que influencia o campo magnético, atraindo mais partículas magnéticas e diminui a probabilidade de entupimento, dependendo de sua abertura. Características estas que refletem diretamente nos resultados de recuperação.

Segundo Luz (2010) no processo de seleção da matriz devem ser feitas, entre outras, as seguintes considerações:

- Gradiente máximo de campo;
- Área superficial de captação por unidade de volume da zona da matriz;

- Capacidade de limpeza da matriz (remoção das partículas magnéticas) com rapidez para manter o sistema de fluxo contínuo;
- Porosidade da matriz para permitir a vazão da polpa; caso ela tenha um valor muito baixo, é necessária maior pressão para obter a vazão ideal sem obstrução;
- O material usado na fabricação das matrizes deve reter o mínimo de magnetização quando as mesmas são removidas do campo; no caso de a matriz reter quantidade significativa de magnetização, torna-se impossível a remoção das partículas magnetizadas.

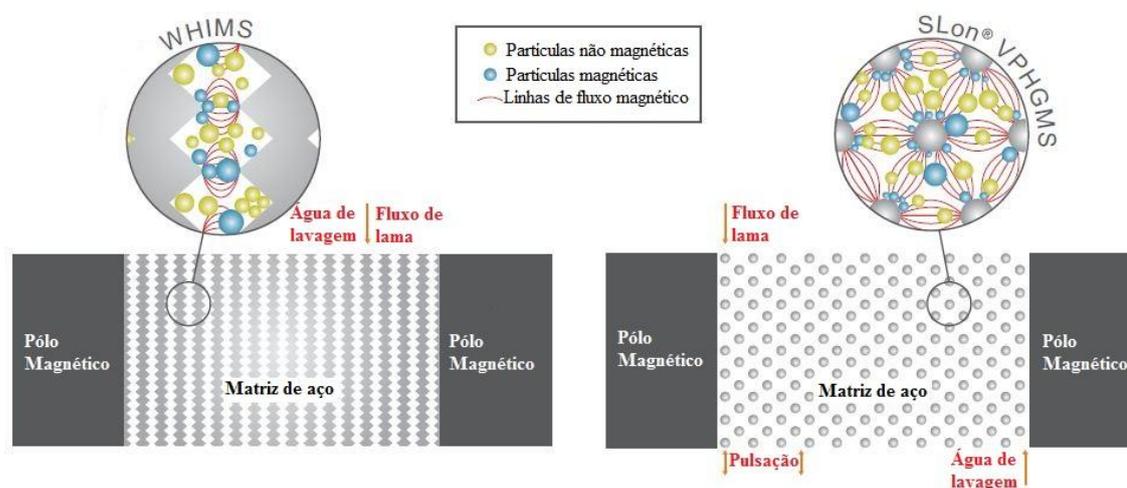
O SLon utiliza uma matriz filamentar construída de barras de aço para acomodar várias faixas de tamanho de alimentação. A tabela 9 tras a relação entre tamanho da haste e tamanha da maior partícula na matriz. As hastes são orientadas perpendicularmente ao campo magnético aplicado, para permitir uma ótima força magnética minimizando o risco de aprisionamento de partículas, quando em comparação com as placas com ranhuras. (Outotec, 2013)

**Tabela 9: Relação entre tamanho da haste e tamanho da maior partícula na Matriz. Fonte: Outotec, 2013.**

Seleção de Materiais da Matriz	
Haste (mm)	A maior das partículas (mm)
1	0,6
1,5	0,8
2	1,2
3	1,5
4	2,0
5	3,0

Os separadores WHIMS utilizam matrizes ferromagnéticas, que consistem de barras de aço inox arredondado as quais formam um conjunto de malhas magnéticas com abertura selecionada em função da granulometria do material ( $< 1,2$  mm) e da quantidade relativa das fases magnéticas.

A figura 10 mostra a diferença entre o sistema de matrizes dos separadores SLon e WHIMS, onde pode-se notar que o separador SLon apresenta certas vantagens em relação ao WHIMS, tais como um melhor espaçamento entre as matrizes, maior número de linhas de fluxo magnético e alimentação, e água de lavagem aplicados em sentidos diferentes.



**Figura 10: Diferença entre o sistema de matrizes WHIMS E SLon. Fonte: Outotec, 2013 (Modificado).**

Analisando a planta de Diao Juntai (Figura 11), apresentada por Dahe (2007), que processa minério de ferro oxidado contendo hematita e magnetita, nota-se que durante a utilização do separador Shp-3200 WHIMS tinha-se uma menor recuperação pois as ranhuras das placas das matrizes magnética eram mais fáceis de entupir apresentando uma disponibilidade em torno de 80 a 90 por cento. No caso do separador SLon a disponibilidade era de 98% – 99% utilizando um SLon-2000 que apresentava um bom resultado apesar da alimentação conter apenas 30,50% Fe, 67,50% de Fe no concentrado, 9,98% na lama e recuperação de ferro 78,94%.

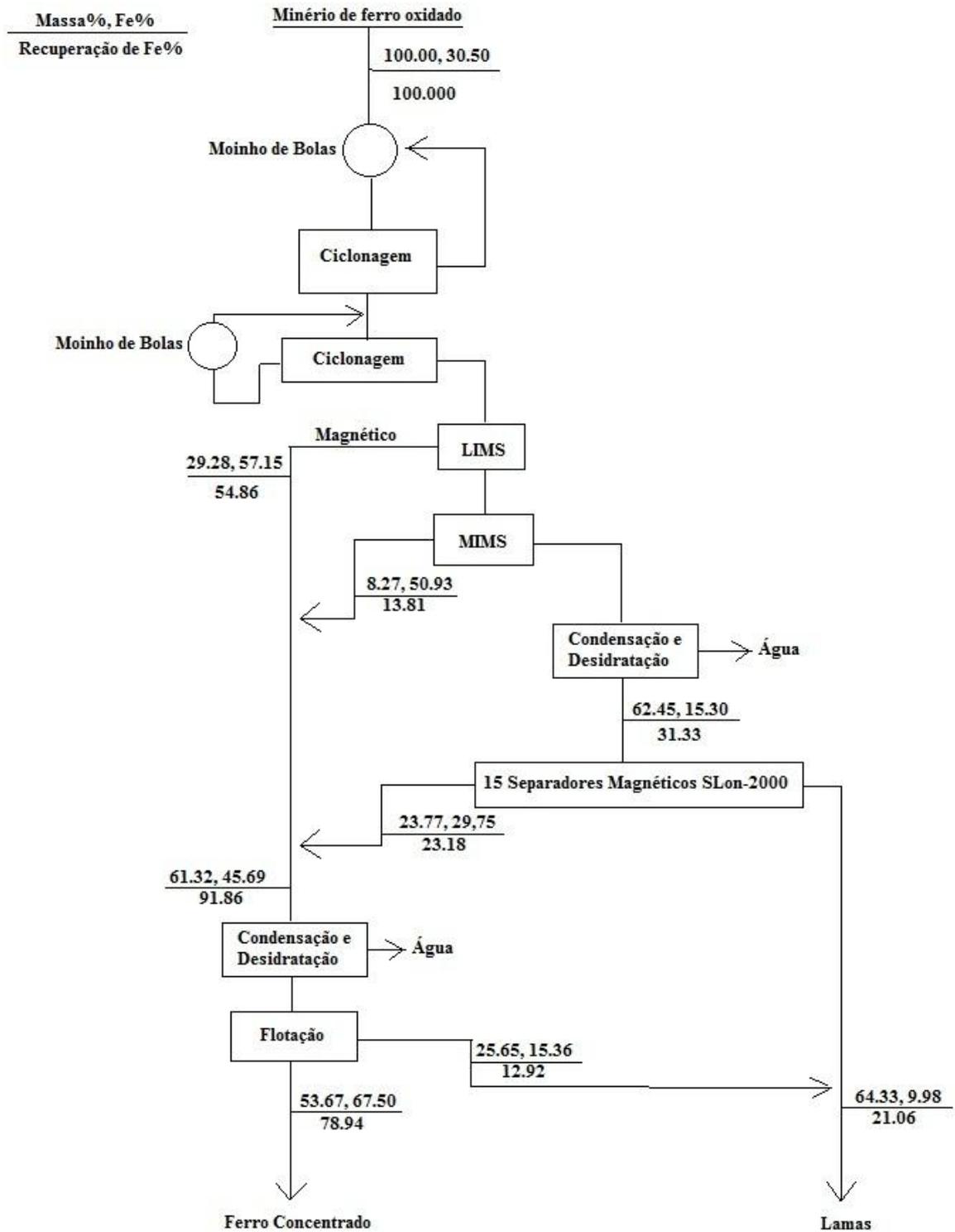


Figura 11: Planta de Diao Juntai. Dahe, 2007 (Modificado).

Um exemplo da utilização do separador Jones é apresentado por Santos (2009) na figura 12, onde foi realizado um estudo para definição da rota de concentração do minério da mina de Fábrica para melhorar a qualidade do *Pellet Feed* lá produzido. Para a fração  $-1+0,15\text{mm}$ , a melhor rota de processo envolveu duplo estágio de Jones, onde foram realizados testes de concentração magnética de alta intensidade, com variação do GAP, campo e água de médio nos estágios *rougher* e *cleaner*.

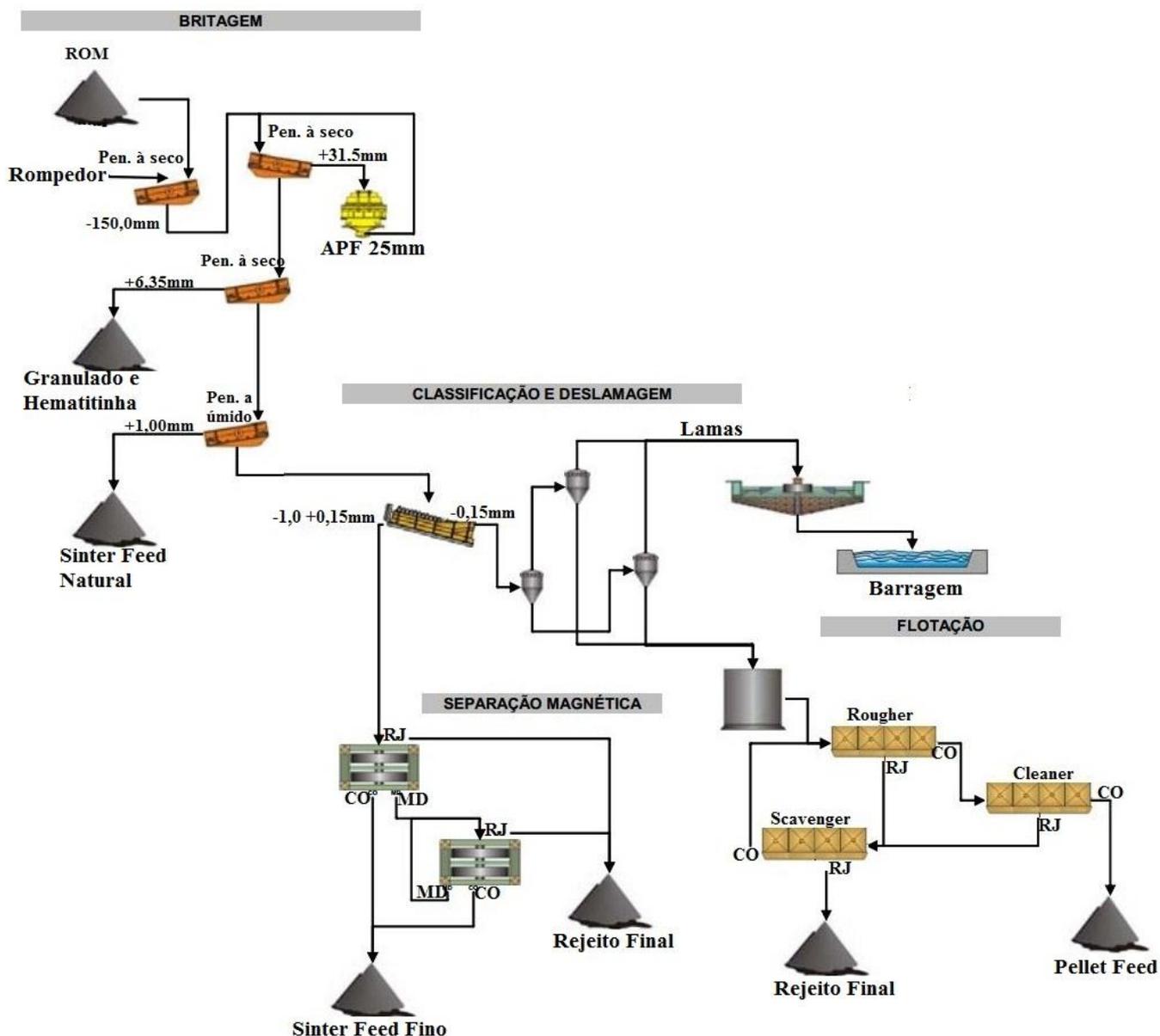


Figura 12: Fluxograma da nova rota de concentração do minério da mina de Fábrica para melhora da qualidade do *Pellet Feed*. Fonte: Santos, 2009.

Segundo Santos (2009), a utilização de um GAP de 2,5mm no estágio *rougher* causou problemas de entupimento das matrizes, devido ao aumento da intensidade do campo magnético que aprisiona as partículas de magnetita e hematita martítica que não conseguem se desprender das matrizes quando passam nos *sprays* de concentrado.

Os testes de separação magnética apresentaram bons resultados, atingindo as especificações do produto desejada que era teor de SiO<sub>2</sub> igual a 2,90%. O circuito apresentou uma recuperação de 77,42%.

Assim observa-se que em ambos os casos apresentados o entupimento do sistema de matrizes do separador Jones é um problema constante, sendo necessários a realização de testes preliminares para definição de variáveis como de taxa de alimentação e abertura dos GAP`s, na busca de se obter um melhor resultado no produto final.

#### 4 CONCLUSÕES

Deste trabalho observa-se que os avanços da separação magnética trazem novos horizontes ao tratamento de minérios, uma vez que, com o aumento das intensidades magnéticas produzidas pelos equipamento mais recentes pode-se melhorar o rendimento das usinas hoje instaladas e utilizar-se da separação magnética para o tratamento de barragens de rejeitos, que contem materiais com concentrações de ferro consideradas baixas no passado, mas que vem a ser economicamente viáveis com o uso desta tecnologia.

Entre os separadores SLon e Jones tem-se como principal diferença o sistema de matrizes. O sistema utilizado no separado Jones é citado em diversos trabalhos como sendo muito problemático causando grandes paradas para manutenção, enquanto as matrizes do SLon são destacadas por não apresentarem entupimentos uma vez que se mantem sempre limpas graças ao sistema de pulsação que é vinculado a ele.

Sendo o separador Jones utilizado na concentração e/ou separação magnética em diversas usinas de tratamento de minérios de ferro no Brasil, pode-se ter nas próximas décadas uma inserção dos separadores magnéticos verticais pulsantes nas novas plantas bem com sua utilização em paralelo nas plantas já existentes.

Observa-se também uma necessidade de estudos com relação aos entupimentos que ocorrem frequentemente no sistema de matrizes dos separadores magnéticos tipo Jones, de modo a se obter parâmetros que auxiliem na melhor eficiência deste equipamento, visto sua grande difusão no mercado.

## **5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

1. Avaliar a aplicação do separador SLon as características dos minérios Brasileiros, bem como sua aplicação na recuperação de barragens.
2. Avaliação do sistema de matrizes do separador WHIMS para sugestão de melhorias e aperfeiçoamentos para evitar entupimentos.
3. Análise econômica da implantação de separadores SLon em usinas de tratamento brasileiras.

## 6 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.; **Development and Commercial Test of SLon-2000 Vertical Ring and Pulsating High-Gradient Magnetic Separator**. *Magnetic and Electrical Separation*, Vol.8, pp.89-100. Maio 1996. Disponível em:  
<[http://www.researchgate.net/publication/50300486\\_SLon\\_Magnetic\\_Separators\\_Applied\\_in\\_the\\_Ilmenite\\_Processing\\_Industry](http://www.researchgate.net/publication/50300486_SLon_Magnetic_Separators_Applied_in_the_Ilmenite_Processing_Industry)>

DAHE, X.; **SLon Magnetic Separators Applied in the ilmenite Processing Industry**. *Physical Separation in Science and Engineering*, September–December 2004, Vol. 13, No. 3–4, pp. 119–126. Disponível em:  
<<http://downloads.hindawi.com/archive/2004/205719.pdf>>

DAHE, X.; **SLon Magnetic Separators Applied in Various Industrial Iron Ore Processing Flow Sheets**. *IRON ORE- PROCEEDINGS -CD-ROM EDITION-*; 245-250 Iron ore CONFERENCE, Iron ore. Perth, WA, 20 - 22 Agosto 2007.

GAUSTEC MAGNETISMO. **G-3600**. 2011.  
Disponível em: < <http://gaustec.com.br/produtos/g-3600/>>

LUZ, A.B; SAMPAIO, J.A; FRANÇA, S.C.A. **Tratamento de Minérios**, 5ª Ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2010, capítulo 9, p.365-395.

OUTOTEC. **SLon® Vertically Pulsating Highgradient Magnetic Separator**. Finlândia, 2013. Disponível em: <[http://www.outotec.com/ImageVaultFiles/id\\_958/d\\_1/cf\\_2/OTE\\_SLon\\_vertically\\_pulsating\\_high-gradient\\_magnet.PDF](http://www.outotec.com/ImageVaultFiles/id_958/d_1/cf_2/OTE_SLon_vertically_pulsating_high-gradient_magnet.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.

ROBERTO, J. B. **Influência dos Diversos Tipos Litológicos nas Operações de Concentração da Instalação de Beneficiamento de Brucutu**. 2010. 219 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

SANTOS, William Kaiser dos. **Rotas de processo para concentração de minérios itabiríticos e hematíticos da Mina de Fábrica**. Mestrado (Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <http://www.ppgem.eng.ufmg.br/defesas/1263M.PDF>

SILVA, Maximiliano Batista da e LUZ, José Aurélio Medeiros da. **Concentração magnética esgotadora de ultrafinos itabiritos**. Rem: Rev. Esc. Minas [online]. 2013, vol.66, n.4, pp. 499-505. ISSN 0370-4467. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672013000400015>.

SVOBODA, Jan. **Magnetic Techniques for the Treatment of Materials**, United States of America, Kluwer Academic, 2004, capítulo 2, p. 67-162.

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