



**Centro de Tecnologia Mineral
Ministério da Ciência e Tecnologia**

Coordenação de Análises Minerais – COAM

Setor de Caracterização - SCT

Desenvolvimento de um modelo para separadores magnéticos tipo Jones

Claudio L. Schneider
Marcelo Calixto

**Rio de Janeiro
Dezembro/2006**

**CT2006-098-00 36º Seminário de Minério de Ferro / 7º Simpósio de Minério de
Ferro – Ouro Preto – Anais v.2: 619-633**

Desenvolvimento de um modelo para separadores magnéticos tipo Jones

Claudio Luiz Schneider¹ e Marcelo Calixto²

Resumo

O objetivo deste trabalho é desenvolver um modelo apropriado para separadores magnéticos de alta intensidade tipo Jones. Os princípios básicos da separação magnética são apresentados e um modelo conceitual é desenvolvido com base em algumas idéias e informações sobre o mecanismo de funcionamento destes separadores. Estas etapas são ilustradas em detalhe. Uma campanha de amostragem foi planejada e executada em uma planta de beneficiamento de minério de ferro para Jones de finos e grossos. Análises granuloquímicas foram feitas em todas as amostras, e parâmetros como amperagem e densidade da polpa de alimentação foram estudados. As simulações com o modelo proposto geraram resultados muito bons, e os parâmetros do modelo proposto foram correlacionados com as variáveis operacionais estudadas. Este artigo apresenta uma metodologia de desenvolvimento e implementação de modelos de operações unitárias em um simulador de plantas.

Palavras-chave: separação magnética, alta intensidade, minério de ferro

VII Simpósio Brasileiro de Minério de Ferro
30 de Agosto a 2 de Setembro de 2006 – Ouro Preto – MG – Brasil

¹ Tecnologista Sênior, CETEM/MCT

² Engenheiro, GAWAS/DIFS/CVRD

Introdução

Separadores magnéticos de alta intensidade tipo Jones tem aplicação importante na concentração de minérios de ferro. Estes separadores se baseiam na diferença de susceptibilidade magnética entre a hematita e o quartzo, possibilitando a separação destas fases minerais. Partículas liberadas de hematita ou partículas que contenha grandes quantidades de hematita na sua composição podem ser defletidas pela presença de um campo magnético, enquanto as partículas de quartzo liberadas e as partículas compostas principalmente por quartzo são direcionadas para o rejeito. Estas operações devem ser contínuas para aplicação em separadores industriais. Nos separadores tipo Jones, um carrossel contendo células magnetizadas pode ser alimentado de forma contínua. Cada célula contém placas magnetizadas, por indução, aumentando tanto o gradiente do campo magnético no interior da célula bem como a superfície interna da célula para coleta de partículas susceptíveis. Partículas do concentrado são literalmente aderidas a estas placas enquanto as partículas constituintes do rejeito devem fluir livremente entre as placas para fora das células. As placas não são lisas, e a presença de aletas ou reentrâncias causa um aumento do gradiente magnético, que é responsável pela força experimentada pelas partículas susceptíveis. A força magnética F que atua em uma partícula submetida a um campo magnético pode ser escrita como o produto de dois fatores:

$$F = V_m f_m \quad (1)$$

onde V_m é o volume magnético da partícula, m^3 , e f_m é a densidade da força magnética, N/m^3 (King, 2001). O volume magnético da partícula é determinado pelas características da partícula e é específico à partícula. A densidade da força magnética é primariamente uma função da geometria do equipamento e do campo magnético gerado pelo equipamento. A densidade da força magnética é, portanto, um parâmetro específico do equipamento.

O conceito de volume magnético é bastante conveniente para cálculos envolvendo partículas minerais, porque o volume magnético de uma partícula composta por mais de um mineral é a soma dos volumes magnéticos dos componentes individuais. O volume magnético de cada componente é dado por:

$$V_m^i = \frac{0,5 V_i \kappa_i}{1 + N \kappa_p} = \frac{0,5 v_i V \kappa_i}{1 + N \kappa_p} \quad (2)$$

onde V_i é o volume do componente, que é dado pela fração em volume do componente v_i multiplicado pelo volume da partícula V , em m^3 , κ_i é a susceptibilidade magnética em volume do mineral, ou componente i , κ_p é a susceptibilidade magnética em volume da partícula, definida como a soma das susceptibilidades magnéticas em volume de cada fase, ou seja $\kappa_p = \sum v_i \kappa_i$, e N é um fator geométrico que depende da forma da partícula e é chamado fator de desmagnetização. N vale 0,333 para partículas esféricas, 0,27 para partículas cilíndricas de comprimento igual ao seu diâmetro e 0,0172 para partículas cilíndricas de comprimento igual a dez vezes o seu diâmetro. (Anderson, 1968). O conceito de volume magnético pode ser aplicado em qualquer geometria ou

equipamento de separação magnética, facilmente. Porém, o valor da susceptibilidade magnética de um mineral pode variar bastante. Por exemplo, a susceptibilidade magnética da hematita pode variar entre 500 e 40.000 $\times 10^{-6}$. Já o quartzo é bastante invariável e sua susceptibilidade magnética varia entre -13 e -17×10^{-6} . (Hunt et. al, 1995). É, portanto, recomendável medir a susceptibilidade magnética dos minerais envolvidos com uma balança de susceptibilidade magnética, para um cálculo acurado do volume magnético de qualquer partícula, composta ou não. Se um valor médio de 20.000×10^{-6} é adotado para a hematita, assumindo-se uma partícula equidimensional ($N = 0,333$) de 0.5mm, temos:

$$V_m^{hematita} = \frac{0,5 \times 20.000 \times 10^{-6} \times \frac{(0,5 \times 10^{-3})^3 \times \pi}{6}}{(1 + 0,333 \times 20.000 \times 10^{-6})} = 6,5 \times 10^{-13} m^3$$

Similarmente, para uma partícula de quartzo,

$$V_m^{quartzo} = \frac{0,5 \times -15 \times 10^{-6} \times \frac{(0,5 \times 10^{-3})^3 \times \pi}{6}}{(1 + 0,333 \times -15 \times 10^{-6})} = -4,91 \times 10^{-16} m^3$$

Assim, para uma partícula composta de hematita e quartzo, com volumes iguais de cada fase, de 1 mm de diâmetro, o volume magnético é

$$V_m = V_m^{hematita} + V_m^{quartzo} = 6,5 \times 10^{-13} - 4,91 \times 10^{-16} \cong 6,5 \times 10^{-13} \cong V_m^{hematita}$$

Ou seja, partículas compostas tendem a se comportar como partículas de hematita pura, já que a susceptibilidade magnética em volume da hematita é muito maior, em termos absolutos, do que a do quartzo. Ainda, a força magnética atuando em partículas de hematita nessa faixa de tamanhos só é significativa para densidades de força magnética da ordem de 10^7 N/m³, resultando em uma força magnética da ordem de 10^{-6} N, comparável à força da gravidade atuando sobre estas partículas, e permitindo sua deflexão.

A densidade de força magnética é definida como

$$f_m = \mu_0 \nabla H^2 \quad N / m^3 \quad (2)$$

onde μ_0 é a permeabilidade magnética do espaço livre, e vale $4\pi 10^{-7}$ N/A², e ∇H^2 é o gradiente do quadrado da força do campo magnético, A²/m³, com $H^2 = H_x^2 + H_y^2 + H_z^2$. Por exemplo, a componente da densidade de força magnética na direção x é calculada por

$$f_{mx} = \mu_0 \left(H_x \frac{\partial H_x}{\partial x} + H_y \frac{\partial H_x}{\partial y} + H_z \frac{\partial H_x}{\partial z} \right) \quad N / m^3 \quad (3)$$

onde H_x é a componente da força do campo magnético na direção x , em A/m, e assim por diante. É importante desenvolver este raciocínio para demonstrar que, em casos de geometria simples, como por exemplo um separador magnético de tambor, a força magnética atuando em uma partícula pode ser calculada de forma aproximada, convertendo-se a equação (3) para coordenadas cilíndricas. Já para separadores magnéticos de alta intensidade, com geometrias bastante complexas, fica claro que a força do campo magnético não é a única responsável pela força atuando na partícula, mas sim o gradiente da força do campo magnético. O uso de placas com geometria um tanto complexa preenchendo as células do separador Jones, provê um gradiente de magnitude suficiente para gerar forças consideravelmente maiores do que as forças gravitacionais atuando nas partículas que contém porções significativas de hematita. Por outro lado, as forças magnéticas que atua nas partículas de quartzo é praticamente desprezível, devido à baixa susceptibilidade magnética deste mineral. Para se ter uma idéia da importância do gradiente, para um campo de indução magnética de 1 Tesla (equivalente a 10.000 Gauss) a força do campo magnético fica em torno de $H \cong B / \mu_0 = 1 / (4\pi 10^{-7}) = 7,96 \times 10^5 \text{ A/m}$. Se assumirmos que o gradiente na direção x

não varia com y e z , e $\frac{\partial H_x}{\partial x} = 1.000,0 \text{ A/m}^2$ temos uma densidade de força magnética equivalente a 1.000 N/m^3 . Para a partícula de hematita aqui considerada, isso resulta em uma força de $6,5 \times 10^{-10} \text{ N}$, que é um valor em torno de quatro ordens de magnitude menor do que a força da gravidade atuando sobre a partícula. Colocando-se de uma maneira simples, não fosse o alto gradiente proporcionado pelas placas no interior das células do separador Jones, a separação magnética da hematita não seria possível. Esse fato é definitivo com respeito à técnica de modelamento a ser utilizada. Sem uma descrição estritamente acurada da geometria do campo magnético induzido no separador, é praticamente impossível calcular, com qualquer precisão, a força magnética atuando na partícula, ainda que as partículas e todas as outras condições sejam bem caracterizadas. É, portanto, necessário propor um modelo baseado nas características básicas do separador, e ajustar os parâmetros do modelo de acordo com observações práticas.

Modelo proposto e implementação

A técnica de modelamento preferencial, baseada nas forças magnéticas atuantes no processo de separação magnética, é preterida em favor de um modelo menos complexo, baseado em uma visão mais simplificada, menos fundamental do processo de separação. Isso é necessário devido às dificuldades inerentes impostas pela configuração geométrica tri-dimensional do gradiente da força do campo magnético. Primeiramente, é necessário estabelecer um modelo de trabalho, para o separador Jones contínuo. Isso é explicado esquematicamente na Figura 1. As etapas do processo são as seguintes: a) primeiramente, as partículas compostas basicamente por hematita e quartzo são alimentadas na célula. Não existe segregação por tamanho ou composição em relação às placas da célula, ou seja, uma partícula, seja qual for a sua composição e tamanho, tem uma probabilidade uniforme de estar localizada próxima à placa ou o mais longe possível da placa, ou em qualquer posição intermediária. b)

durante a alimentação e com a célula movendo-se para fora da zona de alimentação, as partículas com susceptibilidade magnética positiva, já sob a influência do gradiente magnético, começam a se mover em direção à placa. Já as partículas de quartzo, pouco influenciadas pela presença do gradiente magnético, movem-se muito pouco ou permanecem estáticas em relação à placa, movendo-se continuamente com o fluxo de água em direção ao fundo da célula, ou rejeito. c) eventualmente as partículas de hematita ou que contenham quantidades significativas de hematita concentram-se perto da placa formando uma camada ou leito coeso. Partículas de quartzo dentre desta zona permanecem presas no leito coeso. d) as partículas que não formam o leito coeso continuam o seu caminho com o fluxo de polpa, sendo removidas no rejeito.

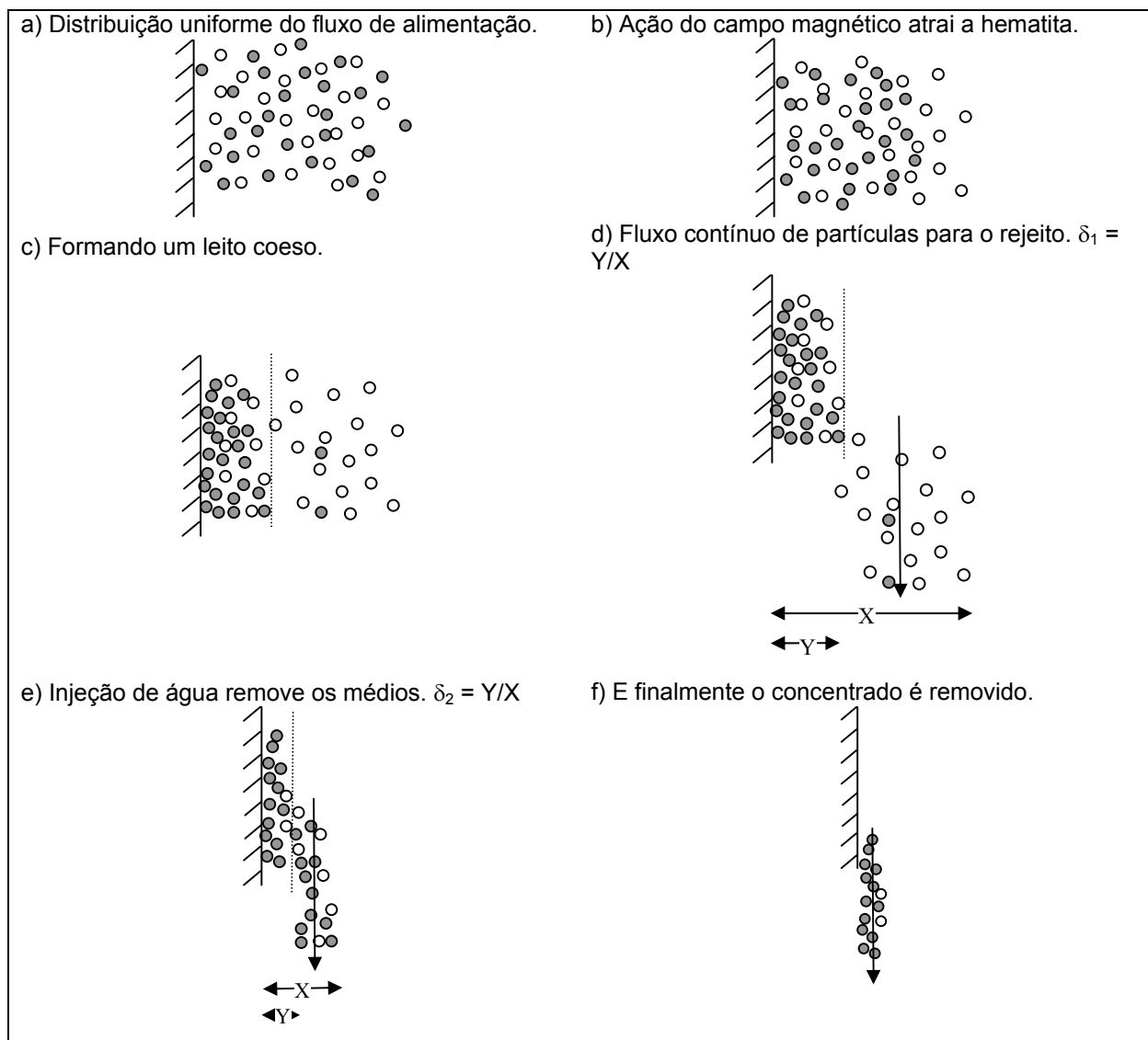


Figura 1: Esquema básico de modelamento do separador Jones.

A espessura do leito coeso remanescente em relação à distância entre placas é um parâmetro importante do modelo porque determina onde ocorre a separação entre

rejeito e outros produtos. Este parâmetro será definido como δ_1 , e é independente das dimensões da célula e) com a célula na posição de médios (*middlings*) o leito coeso é lavado com um jato de água sob alta pressão. As partículas que estão aderidas ao leito coeso podem se desprender com a força da água, e o leito coeso é dividido em uma segunda porção, definida como δ_2 e independente de δ_1 . Estas partículas formam os médios. f) já com a célula na posição do concentrado, as placas são descarregadas completamente sob ação do jato de água.

Dois parâmetros importantes do modelo já foram definidos no esquema da Figura 1, e definem as recuperações de rejeito, médio e concentrado. Resta definir o perfil de concentração do leito coeso, em função da distribuição das fases minerais na alimentação. Um modelo útil pode ser derivado considerando a energia disponível para a formação do leito que resulta da interação entre o gradiente da força do campo magnético aplicado e a susceptibilidade magnética das partículas distribuídas no interior da célula. Podemos entender a formação do leito coeso como uma mudança de potencial quando as partículas susceptíveis mudam a sua posição dentro do leito, como mostrado na Figura 2.

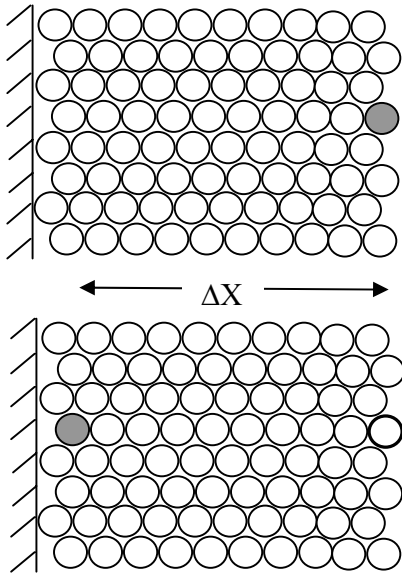


Figura 2: Mudança de potencial quando uma partícula muda de posição em um leito de partículas.

Assim, à medida que uma partícula com volume magnético v_p se aproxima da placa, em um leito de volume magnético v_m , o potencial desta partícula é reduzido. Este potencial deve ser interpretado como a capacidade da partícula se deslocar em relação ao leito, ou como a capacidade de organização do leito, em termos de entropia. Assume-se que a densidade de força magnética é constante no intervalo ΔX . Assim,

$$\begin{aligned}
 \Delta S &= S(\text{partícula na posição } X + \Delta X) - S(\text{partícula na posição } X) \\
 &= v_p f_m (X + \Delta X) + v_m f_m X - v_m f_m (X + \Delta X) - v_p f_m X \\
 &= f_m (v_p - v_m) \Delta X
 \end{aligned} \tag{4}$$

Esta formulação é, em vários aspectos, idêntica à formulação proposta por King (2001) para processos de estratificação, com a força do campo magnético substituindo a aceleração da gravidade e os volumes magnéticos da partícula e do leito substituindo as respectivas densidades. A analogia é sem dúvida válida. A derivação do modelo é em todos os aspectos similar ao modelo de estratificação, com as substituições acima. O resultado é um modelo relativamente simples, com um único parâmetro que aqui pode ser denominada de constante de estratificação magnética. Quanto maior o valor da constante, maior a organização da camada coesa, e maior será a concentração de hematita para distâncias pequenas da placa. Quanto menor o valor da constante, menos organizada a camada e menor o teor de hematita nas imediações da placa. Com isso, a base do modelo do separador Jones está definida.

A implementação do modelo foi feita no simulador de plantas Modsim™, com o desenvolvimento de um ícone para representar o separador tipo Jones, e posições para três fluxos de produtos, rejeito, médio e concentrado, além de um fluxo de alimentação de água de lavagem. Em princípio, o modelo é sensível aos valores de susceptibilidade magnética das fases, mas não permite que uma mesma fase tenha mais de uma susceptibilidade magnética (susceptibilidade magnética distribuída), mesmo porque isso nunca foi medido de forma apropriada para um mineral. O modelo permite a utilização de classes de teor com susceptibilidades magnéticas específicas para cada classe de teor. O próximo passo é correlacionar a performance do modelo com dados de planta.

Experimental

O objetivo aqui é obter informações que subsidiem o modelo proposto, ou seja, determinar se o modelo pode ser utilizado para simular um separador Jones industrial. O segundo objetivo é gerar informações que permitam avaliar, em uma primeira análise, o valor dos parâmetros do modelo para condições operacionais distintas. A estratégia utilizada foi amostrar separadores Jones da planta de concentração da mina de Conceição, tanto no circuito de finos como no circuito de grossos. Para cada um desses circuitos, foi feita uma amostragem longa, de duas horas, com alíquotas coletadas de 15 em 15 minutos da alimentação e dos produtos. No caso do Jones de grossos, a válvula dos médios (*middlings*) estava aberta, e o material deste fluxo estava retornando para a alimentação, diferentemente do circuito de Jones de finos. Cada amostra foi processada quanto ao conteúdo de sólidos e granuloquímica completa (Fe, SiO₂, P, Al₂O₃, Mn TiO₂, Cao e MgO por faixa de tamanhos e por fluxo). Os teores de SiO₂ são um bom indicativo do teor de quartzo, e assumiu-se que o teor de hematita é complementar ao teor de quartzo para fechamento em 100% da mineralogia. Também se assumiu que a hematita e o quartzo estão completamente liberados, porém foi tomado o cuidado de arquivar as amostras para análise de imagens e medidas dos espectros de composição, em trabalhos futuros. Durante a operação, o sistema PI da planta grava continuamente valores de densidade da polpa de alimentação, vazão volumétrica de polpa, vazão de sólidos e amperagem da bobina de indução. A amperagem e a densidade da polpa de alimentação são consideradas variáveis operacionais importantes na performance dos separadores Jones.

Para a avaliação da relação entre as variáveis operacionais e os parâmetros do modelo, foram planejadas amostragens instantâneas, de forma que as mudanças dos parâmetros operacionais para valores diferentes daqueles utilizados na operação normal da planta perdurassem por um tempo mínimo, somente suficiente para a retirada de alíquotas de todos os fluxos envolvidos, em quantidade suficiente para análise. Desta forma, a amostragem não afeta significativamente o controle de qualidade da usina. Foram estudados os efeitos da amperagem e da densidade de polpa. As amostragens são sumarizadas na Tabela 1.

Tabela 1: campanha de amostragem dos circuitos de Jones da planta de Conceição

Circuito/Amostra	Densidade da polpa da alim., t/m ³	Vazão da polpa da alim., m ³ /h	Vazão de sólidos, t/h	Amp., A	Tempo de amostragem, h:mm
Grossos/padrão	1,52	611,93	410,42	300,43	2:00
Grossos/densidade<	1,38	819,03	402,09	300,19	0:15
Grossos/amp.<	1,50	616,75	397,66	251,43	0:20
Finos/padrão	1,73	650,80	623,23	294,18	2:15
Finos/densidade<	1,62	755,61	613,30	295,50	0:15
Finos/amp.<	1,72	635,61	597,71	260,32	0:12

As análises granuloquímicas são necessárias, e constituem dados do sistema para o simulador. No entanto, o simulador não trabalha com química, e sim com minerais, ou partículas compostas de fases minerais. Assim, se faz necessário converter os dados de granuloquímica para granulomineralogia, por assim dizer. Assume-se que o quartzo corresponde diretamente à análise de SiO₂, e a hematita, componente principal dos óxidos de ferro, constitui o restante das fases mineralógicas. Esta simplificação da mineralogia é necessária, mas serve como um bom modelo mineralógico para minérios de ferro deste tipo.

Tabela 2: Granulomineralogia, circuito Jones de grossos, amostragem longa.

Malha (mm)	Passante Acum. (%)	Mineralogia		Passante Acum. (%)	Mineralogia		Passante Acum. (%)	Mineralogia		Passante Acum. (%)	Mineralogia	
		Quartzo	Hematita		Quartzo	Hematita		Quartzo	Hematita		Quartzo	Hematita
		Alimentação			Concentrado			Médio			Rejeito	
Anal.		16,43	83,57		4,14	95,86		18,80	81,20		54,45	45,55
Cal.		16,43	83,57		4,14	95,86		18,80	81,20		52,37	47,63
4,00	99,30	26,70	73,30	100,00	9,40	90,60	100,00	20,50	79,50	99,60	46,65	53,35
2,00	98,60	26,70	73,30	100,00	9,40	90,60	99,50	20,50	79,50	98,90	46,65	53,35
1,00	96,30	26,70	73,30	98,80	9,40	90,60	97,10	20,50	79,50	96,90	46,65	53,35
0,50	76,70	13,10	86,90	89,70	4,15	95,85	78,70	15,74	84,26	76,60	41,98	58,02
0,25	54,20	16,71	83,29	72,50	4,41	95,59	51,80	16,36	83,64	54,90	60,28	39,72
0,15	36,70	21,83	78,17	59,70	5,44	94,56	35,20	21,24	78,76	34,80	69,65	30,35
0,106	30,20	17,08	82,92	52,20	5,05	94,95	27,10	26,56	73,44	26,10	73,81	26,19
0,075	22,70	9,87	90,13	42,60	2,84	97,16	19,00	22,89	77,11	16,30	53,76	46,24
0,045	10,60	9,96	90,04	22,50	1,89	98,11	7,90	13,51	86,49	6,30	24,77	75,23

Tabela 3: Granulomineralogia, circuito Jones de grossos, amostragem instantânea com densidade menor.

Malha (mm)	Passante Acum. (%)	Mineralogia		Passante Acum. (%)	Mineralogia		Passante Acum. (%)	Mineralogia		Passante Acum. (%)	Mineralogia	
		Quartzo	Hematita		Quartzo	Hematita		Quartzo	Hematita		Quartzo	Hematita
		Alimentação			Concentrado			Médio			Rejeito	
Anal.		18,93	81,07		4,42	95,58		19,91	80,09		51,65	48,35
Cal.		15,85	84,15		4,70	95,30		19,98	80,02		51,65	48,35
4,00	100,00			100,00			100,00			100,00		
2,00	100,00	25,00	75,00	100,00	2,00	98,00	100,00	5,00	95,00	100,00	55,00	45,00
1,00	98,90	23,47	76,53	97,90	7,99	92,01	97,50	14,87	85,13	98,20	42,44	57,56
0,50	89,10	16,35	83,65	80,60	4,89	95,11	76,00	11,45	88,55	76,40	44,65	55,35
0,25	71,60	20,32	79,68	57,40	4,85	95,15	52,00	36,75	63,25	50,70	59,24	40,76
0,15	58,10	29,98	70,02	41,70	6,69	93,31	35,90	18,08	81,92	34,90	71,58	28,42
0,106	50,60	22,56	77,44	32,80	5,22	94,78	30,40	35,31	64,69	23,00	70,46	29,54
0,075	40,70	11,82	88,18	26,70	2,31	97,69	23,10	24,99	75,01	15,80	55,92	44,08
0,045	21,10	4,14	95,86	10,70	0,88	99,12	11,80	13,53	86,47	5,00	18,86	81,14

Tabela 4: Granulomineralogia, circuito Jones de grossos, amostragem instantânea com amperagem menor.

Malha (mm)	Passante Acum. (%)	Mineralogia		Passante Acum. (%)	Mineralogia		Passante Acum. (%)	Mineralogia		Passante Acum. (%)	Mineralogia	
		Quartzo	Hematita		Quartzo	Hematita		Quartzo	Hematita		Quartzo	Hematita
		Alimentação			Concentrado			Médio			Rejeito	
Anal.		19,44	80,56		4,45	95,55		17,17	82,83		51,27	48,73
Cal.		18,01	81,99		3,46	96,54		15,90	84,10		49,53	50,47
4,00	100,00			100,00			100,00			100,00	40,23	59,77
2,00	100,00	20,63	79,37	100,00	6,80	93,20	100,00	13,19	86,81	99,60	40,23	59,77
1,00	98,30	16,88	83,12	99,20	6,80	93,20	97,90	13,19	86,81	97,00	40,23	59,77
0,50	81,80	24,01	75,99	89,60	4,61	95,39	80,90	12,20	87,80	77,60	38,38	61,62
0,25	61,30	32,75	67,25	73,80	4,56	95,44	51,80	15,72	84,28	51,50	55,33	44,67
0,15	43,80	25,11	74,89	57,40	5,55	94,45	34,90	27,75	72,25	37,90	71,51	28,49
0,106	37,10	12,95	87,05	51,40	3,75	96,25	26,60	26,23	73,77	26,40	73,38	26,62
0,075	28,40	4,92	95,08	41,50	1,83	98,17	18,10	18,19	81,81	15,60	61,80	38,20
0,045	13,90	4,14	95,86	21,00	0,95	99,05	6,80	8,54	91,46	7,40	23,81	76,19

Tabela 5: Granulomineralogia, circuito Jones de finos, amostragem longa.

Malha (mm)	Passante Acum. (%)	Mineralogia		Passante Acum. (%)	Mineralogia		Passante Acum. (%)	Mineralogia	
		Quartzo	Hematita		Quartzo	Hematita		Quartzo	Hematita
		Alimentação			Concentrado			Rejeito	
Anal.		31,83	68,17		9,15	90,85		84,81	15,19

Cal.		27,67	72,33		6,40	93,60		82,22	17,78
4,00	100,00			100,00			100,00		
2,00	100,00			100,00			100,00		
1,00	100,00	87,00	13,00	100,00	51,00	49,00	100,00	93,00	7,00
0,50	99,70	87,00	13,00	99,90	51,00	49,00	99,30	90,65	9,35
0,25	94,70	75,60	24,40	99,20	34,50	65,50	81,30	89,65	10,35
0,15	84,10	50,62	49,38	94,40	23,40	76,60	52,00	86,48	13,52
0,106	71,50	34,36	65,64	88,20	9,84	90,16	32,90	83,03	16,97
0,075	60,20	12,11	87,89	74,00	3,11	96,89	17,20	66,45	33,55
0,045	25,50	2,28	97,72	38,50	0,99	99,01	4,80	24,90	75,10

Tabela 6: Granulomineralogia, circuito Jones de finos, amostragem instantânea com densidade menor.

Malha (mm)	Passante Acum. (%)	Mineralogia		Passante Acum. (%)	Mineralogia		Passante Acum. (%)	Mineralogia	
		Quartzo	Hematita		Quartzo	Hematita		Quartzo	Hematita
		Alimentação			Concentrado			Rejeito	
Anal.		27,93	72,07		7,62	92,38		85,55	14,45
Cal.		27,93	72,07		7,62	92,38		83,40	16,60
4,00	100,00			100,00			100,00		
2,00	100,00			100,00			100,00	93,53	6,47
1,00	100,00	35,00	65,00	100,00	78,00	22,00	99,80	93,53	6,47
0,50	99,30	81,08	18,92	99,90	78,00	22,00	99,20	93,53	6,47
0,25	94,20	74,52	25,48	99,20	38,95	61,05	83,90	92,87	7,13
0,15	83,70	57,91	42,09	94,40	18,64	81,36	56,10	90,30	9,70
0,106	71,70	32,55	67,45	88,00	10,95	89,05	32,20	80,97	19,03
0,075	60,80	12,68	87,32	73,70	4,15	95,85	20,50	67,71	32,29
0,045	26,90	3,46	96,54	37,80	2,32	97,68	5,10	20,48	79,52

Tabela 7: Granulomineralogia, circuito Jones de finos, amostragem instantânea com amperagem menor.

Malha (mm)	Passante Acum. (%)	Mineralogia		Passante Acum. (%)	Mineralogia		Passante Acum. (%)	Mineralogia	
		Quartzo	Hematita		Quartzo	Hematita		Quartzo	Hematita
		Alimentação			Concentrado			Rejeito	
Anal.		31,83	68,17		6,05	93,95		80,12	19,88
Cal.		27,67	72,33		6,05	93,95		77,38	22,62
4,00	100,00			100,00			100,00	89,90	
2,00	100,00			100,00			99,90	89,90	
1,00	100,00	92,04	7,96	100,00			99,80	89,90	10,10
0,50	99,90	92,04	7,96	100,00	36,00	64,00	99,10	89,90	10,10
0,25	95,60	76,18	23,82	99,10	47,14	52,86	84,80	89,10	10,90
0,15	81,60	52,19	47,81	96,10	18,38	81,62	61,60	86,89	13,11

0,106	72,60	32,05	67,95	89,10	8,96	91,04	39,30	81,03	18,97
0,075	58,60	10,76	89,24	73,50	3,59	96,41	21,40	57,00	43,00
0,045	29,40	2,76	97,24	45,10	1,34	98,66	8,40	20,83	79,17

Os balanços de massa calculados para as amostragens são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8: Balanços de massa obtidos nas amostragens.

Circuito/Amostra	Alim., t/h	Alim. nova, t/h	Rejeito, t/h	Médio, t/h	Concentrado, t/h
Grossos/padrão	410,42	365,27	123,13	45,15	242,15
Grossos/densidade<	402,09	357,86	109,02	44,23	248,84
Grossos/amperagem<	397,66	353,92	115,43	43,74	238,49
Finos/padrão	623,23	-	174,50	-	448,73
Finos/densidade<	613,30	-	159,84	-	453,46
Finos/amperagem<	597,71	-	188,34	-	409,37

Os dados das amostras de cabeça, embora medidos, não são dados de simulação. Os dados de simulação são dados de granulomineralogia, e os teores de cabeça são calculados a partir destas distribuições. Os resultados são apresentados de forma resumida na Tabela 9.

Tabela 9: Balanços mineralógicos calculados a partir de granulomineralogia.

Circuito/Amostra	Quartzo alim., %	Quartzo alim. nova, %	Quartzo Rejeito, %	Quartzo Médio, %	Quartzo Concentrado, %
Grossos/padrão	16,43	21,1	52,37	18,8	4,14
Grossos/densidade<	15,85	18,81	51,65	19,98	4,70
Grossos/amperagem<	18,01	19,72	49,53	15,90	3,46
Finos/padrão	27,67	-	82,22	-	6,40
Finos/densidade<	27,93	-	83,40	-	7,62
Finos/amperagem<	27,67	-	77,38	-	6,05

Tendo em mente que os objetivos deste trabalho estão relacionados ao modelo proposto para o separador Jones, e para evitar complicações desnecessárias, as simulações das condições de cada amostragem foram feitas para circuito aberto, ou seja, no caso do Jones de grossos, a alimentação de cada unidade foi considerada, e não a alimentação nova do circuito, e, conseqüentemente o fluxo de médios da simulação fica aberto, e não retorna para unir-se à alimentação nova porque este já está considerado na alimentação da unidade. Isso facilita em muito a visualização dos resultados.

Seis simulações foram preparadas com dados de granulomineralogia, e as taxas de alimentação medidas. Os valores dos três parâmetros de modelo são inicialmente arbitrários, mas os resultados das Tabelas 8 e 9 podem ser usados como alvo para o simulador. O sistema de simulações iterativas no Modsim™ permite que um, dois ou até cinco parâmetros possam ser variados de um valor máximo até um valor mínimo

com um tamanho de passo definido. Por exemplo, pode-se definir que δ_1 varie de 0,1 à 0,9 em intervalos de 0,05. Isso implica em 18 simulações consecutivas. O *output* do simulador pode ser configurado para armazenar dados de simulações iterativas dos fluxos de interesse, e incluindo variáveis de interesse, como o teor de quartzo e o fluxo de massa. Simultaneamente, pode-se definir que δ_2 varie de 0,1 a 0,9 com passo de 0,05, e a constante de estratificação magnética varie de 0.002 à 0.004, com passo de 0,0001. Isso implica em $18 \times 18 \times 21 = 6.804$ simulações consecutivas. Embora o número seja elevado, para simulações em circuito aberto que não exigem muitas convergências internas, trata-se de poucos minutos de cálculos, talvez segundos, dependendo da capacidade computacional disponível. No caso dos Jones de finos, δ_2 não tem efeito já que a válvula de médios não é aberta, e os cálculos podem ser feitos ainda mais rapidamente.

Com os resultados das simulações em mãos, pode-se explorar a partir de um sistema externo como Excel ou algum aplicativo apropriado, procurando-se determinar aquela combinação de valores de parâmetros que dá a resposta mais próxima dos valores nas Tabelas 8 e 9. Os valores dos parâmetros assim obtidos definem as relações entre o modelo e as variáveis operacionais dos separadores Jones.

Resultados

A Figura 3 mostra o resultado de uma simulação do Jones de finos operando nas condições padrão, com parâmetros de modelo que geram o resultado o mais próximo possível dos valores das Tabelas 8 e 9.

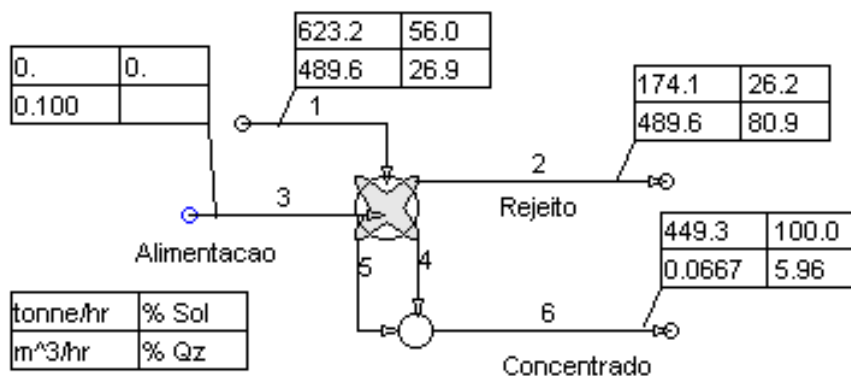


Figura 3: Simulação do Modsim™ do Jones de finos na configuração padrão e parâmetros otimizados.

Pode-se verificar que os resultados são realmente muito próximos dos valores medidos, e esse fato por si só é um bom indicativo de que o modelo de estratificação magnética é um bom modelo para separadores Jones.

Tabela 10: Balanços de massa obtidos nas simulações.

Circuito/Amostra	Alimentação, t/h	Alimentação nova, t/h	Rejeito, t/h	Médio, t/h	Concentrado, t/h
Grossos/padrão	410,4	371,0	120,0	39,4	251,0

Grossos/densidade<	402,1	291,8	110,3	48,5	243,3
Grossos/amperagem<	397,8	294,2	103,6	48,8	245,3
Finos/padrão	623,2	-	174,1	-	449,3
Finos/densidade<	613,4	-	159,1	-	454,3
Finos/amperagem<	597,6	-	188,5	-	409,3

Tabela 11: Balanços mineralógicos das simulações a partir de granulomineralogia.

Circuito/Amostra	Quartzo alimentação, %	Quartzo alimentação nova, %	Quartzo Rejeito, %	Quartzo Médio, %	Quartzo Concentrado, %
Grossos/padrão	15,3		43,9	16,9	1,35
Grossos/densidade<	15,6		41,6	21,12	2,67
Grossos/amperagem<	15,4		44,08	20,03	2,04
Finos/padrão	26,9	-	80,9	-	5,96
Finos/densidade<	26,5	-	82,3	-	7,00
Finos/amperagem<	28,1	-	75,9	-	5,99

Tabela 12: Parâmetros do modelo de estratificação magnética.

Circuito/Amostra	δ_1	δ_2	α	Resíduo
Grossos/padrão	0,5	0,8	0,0019	4.57
Grossos/densidade<	0,55	0,75	0,0014	2,96
Grossos/amperagem<	0,55	0,75	0,0016	3,20
Finos/padrão	0,43	-	0,0031	0,053
Finos/densidade<	0,46	-	0,0029	0,071
Finos/amperagem<	0,40	-	0,0028	0.029

Conclusões

É evidente que modelo proposto funciona muito bem como modelo para separadores magnéticos de alta intensidade tipo Jones. Em geral, os resultados obtidos são significativamente melhores para o circuito de finos, ainda que os resultados do circuito de grossos sejam muito bons. Isso provavelmente resulta da simplificação inicial que assume liberação completa das fases. Esta simplificação não tem impacto significativo no circuito de finos, onde as partículas devem estar em grande parte liberadas. Já para o circuito de grossos, é provável que não ocorra liberação completa, e isso implica em alguns erros. Em trabalhos correntemente em andamento, a liberação das partículas nos fluxos será medida, e as simulações serão expandidas para incluir os espectros de liberação. Assim, espera-se uma melhoria significativa na qualidade das simulações referentes ao circuito de grossos.

Também em geral, pode-se observar que as constantes de separação obtidas são significativamente maiores para o circuito de finos do que para o circuito de grossos. Isto significa que o circuito de finos é bastante mais eficiente do que o circuito de grossos, e indica claramente que o tamanho de partículas tem uma influência definitiva no valor da constante. Este aspecto deverá ser incorporado no modelo de previsão de performance a ser implementado.

Quanto aos resultados das medições do efeito da amperagem e da densidade de sólidos, duas importantes variáveis operacionais, observa-se que a condição padrão é a melhor condição entre as alternativas estudadas, nos dois circuitos. Claramente, e dentro do esperado, a condição padrão é próxima da operação ótima, e isso deve ser resultado da experiência diária na operação dos separadores.

A piora na estratificação do leito com a redução da amperagem é esperada. Pode-se supor que quanto maior a força magnética, maior o efeito de estratificação do leito, e melhor a eficiência dos separadores. A queda de qualidade com a diluição da polpa também é esperada. A surpresa é que o tamanho do leito coeso aumentou com a queda da densidade nos dois casos. Esse fenômeno não tem explicação simples. Ainda, diluir a polpa é tão deletério quanto, ou pior que reduzir a amperagem.

Os dados aqui apresentados são básicos, e já permitem expressar os parâmetros do modelo em termos de tamanho de partícula, densidade de polpa e amperagem. No entanto, este trabalho só será completado quando as simulações com dados de simulação estiverem disponíveis. O modelo implementado no Modsim™ já pode ser utilizado em simulações da planta na sua forma atual. A rotina com parâmetros de processo para previsão dos parâmetros do modelo será implementada em um segundo modelo de simulação.

Mais importante que os resultados obtidos neste trabalho especificamente, é o fato de que um método bastante pragmático foi apresentado para o desenvolvimento de um modelo de processo. A parte complicada é, e sempre será, a concepção do modelo e a organização das idéias. Uma vez que esta etapa tenha sido vencida satisfatoriamente, os parâmetros do modelo proposto podem ser estudados de forma sistemática, através da implementação do modelo em um simulador de plantas adequado. O Modsim™ é distribuído com um kit de desenvolvimento, e usuários podem implementar seus próprios modelos de forma completamente independente. O sistema de simulações iterativas permite que os parâmetros do modelo implementado sejam avaliados com base em dados reais de processo, permitindo a expansão do entendimento de processos reais. É claro que, mesmo processos muito complexos, como por exemplo flotação, poderão ser melhor entendidos com técnicas de modelamento similares às aqui demonstradas.

Referências

- King, R.P. 2001, *Modeling & Simulation of Mineral Processing Systems*. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- Anderson, J.C. 1968, *Magnetism and Magnetic Materials*. Chapman and Hall Ltd, London, p.24.
- Hunt C. P., Moskowitz B. M., and Banejee S. K., 1995, Magnetic Properties of Rocks and Minerals, *Rock Physics and Phase Relations, A Handbook of Physical Constants*, American Geophysical Union, Reference Shelf 3.

Development of a model for Jones wet high intensity magnetic separator

Claudio Luiz Schneider¹ and Marcelo Calixto²

Abstract

The objective of this work is to develop a suitable model for Jones wet high intensity magnetic separators. The principles of magnetic separation are discussed and a model is developed based on a few ideas and the mechanics of these separators. These steps are illustrated in detail. A sampling campaign was planned and carried out at a mineral processing plant including the fine and coarse circuits. Size and chemical analysis by size were carried out for every sampled stream, and operating parameters such as current and feed pulp solids content were studied. The simulations with the proposed model produced very good results, and the parameters obtained were correlated with the operating variables under scrutiny. This paper presents a system for the development and implementation of unit models in a plant wide simulator.

Key words: magnetic separation, high intensity, iron ore

VII Brazilian Iron Ore Symposium
September 12th to 15th, 2006 – Ouro Preto – MG – Brazil

¹ Senior Technologist, CETEM/MCT

² Engineer, GAWAS/DIFS/CVRD