

DETERMINAÇÃO DA MALHA DE CONTROLE PARA OPERAÇÃO DO CIRCUITO DE JIGAGEM DE BRUCUTU ATRAVÉS DA CRIAÇÃO DE ÁBACO OPERACIONAL¹

Cristiano Geraldo de Sales²
Gunter Lipper²
Nilson Nedes de Paula³
Eduardo Moreira Pinto⁴
Danielle Portes⁵
José Benedito Roberto⁶

Resumo

A jigagem é um processo que utiliza o método de concentração gravítica utilizada para recuperação de minerais portadores de Fe, que emprega as diferenças de densidades entre os minerais úteis (concentrado) e de ganga (rejeito). Neste trabalho teve-se o objetivo de se realizar levantamento estatístico e utilizar de correlações entre as seguintes variáveis da jigagem da Usina de Brucutu: recuperação mássica, grau de abertura de comporta, teores de Fe no concentrado e na alimentação. Os primeiros ensaios exploratórios foram realizados regulando-se a comporta em três diferentes posições: 25%, 44% e 100%, pelas quais foi possível se determinar as recuperações mássicas e qualidade dos produtos para cada posição. Por análise de regressão foi obtida a seguinte função logarítmica entre recuperação mássica e grau de abertura de comporta, obtendo-se bom grau de correlação: $RM = 0,2918 \times \ln(AC) + 0,996$. Nesta mesma etapa foi verificado também que os teores de Fe no concentrado e Fe na alimentação também se correlacionavam a partir do grau de abertura de comporta, sobre uma tendência logarítmica, sendo gerada a seguinte função: $Fe\ Co = -0,0305 \times \ln(AC) + Fe\ Alim \times 1,0034$. Deste modo, a partir do levantamento estatístico do banco de dados histórico da Usina, pôde-se determinar um modelo matemático envolvendo todas variáveis supracitadas, através da elaboração de um ábaco operacional. Este modelo envolve diversas funções logarítmicas para cada faixa de teores de Fe na alimentação a partir de diferentes graus de abertura de comporta.

Palavras-chave: Jigagem; Grau de abertura de comporta; Ábaco operacional.

DETERMINATION OF A CONTROL LOOPING FOR THE OPERATION OF THE BRUCUTU JIGGING CIRCUIT THROUGH THE CREATION OF AN OPERATIONAL ABACUS

Abstract

Jigging is a process that utilizes the gravitic concentration method applied for the recovery of minerals that contains Fe, which uses the density difference between valuable minerals (concentrate) and non valuable minerals (tailings). This research aims to make a statistical survey and to utilize correlations among the following jigging variables: mass recovery, gate opening percentage, iron ore content in the concentrate and feed. The first exploratory test works were carried out regulating the opening in 3 different positions: 25%, 44% and 100%, whereby it was possible to determine the mass recoveries and the product qualities for each position. From regression analysis the following logarithmic function was obtained between mass recovery and gate opening percentage, obtaining a good correlation: $RM = 0,2918 \times \ln(AC) + 0,996$. In this same stage it was also verified that the Fe content in the concentrate and feed, also has a correlation from the gate opening percentage, on a logarithmic trend, generating the following function: $Fe\ Co = -0,0305 \times \ln(AC) + Fe\ Alim \times 1,0034$. Thus, from the statistical survey of the database, a mathematical model could be determined involving all mentioned variables, through the development of an operational abacus. This model involves several logarithmic functions for each Fe content range in the feed from different gate opening percentages.

Keywords: Jigging; Gate opening percentage; Operational abacus.

¹ Contribuição técnica ao 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 19 a 22 de setembro de 2010, Belo Horizonte, MG.

² Engenheiro de Processo, Gerência de Engenharia de Processo, Vale, Brasil

³ Engenheiro de Processo, Gerência de Desenvolvimento de Processo, Vale, Brasil

⁴ Técnico de Processo, Gerência de Operação de Usina, Vale, Brasil

⁵ Estagiária de Processo, Gerência de Engenharia de Processo, Vale, Brasil

⁶ Msc. Supervisor de Processo de Curto Prazo, Gerência de Operação de Usina, Vale, Brasil

1 INTRODUÇÃO

1.1 Revisão da Literatura

O jigge é um equipamento de concentração gravítica que é intensamente utilizado devido à sua eficiência, simplicidade de operação e manutenção.

Essencialmente, o jigge é uma caixa com aberturas no topo e na base, esta última dotada de um crivo (tela). A descarga possui ainda uma comporta regulável para escoamento do fluxo de concentrado, conforme ilustra a Figura 1.

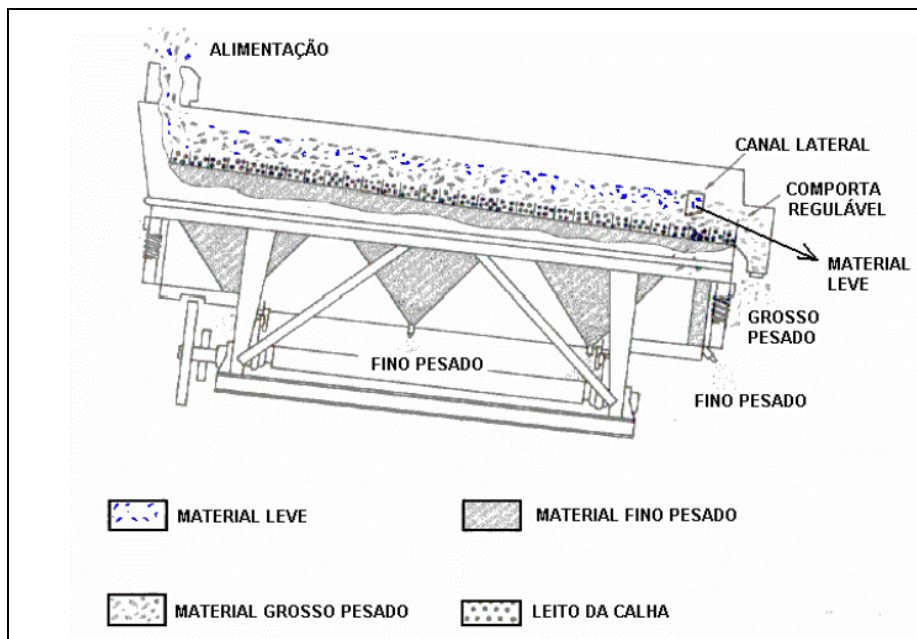


Figura 1 – Diagrama representativo dos fluxos e partes componentes de um jigge.

As partículas do minério são suportadas pelo crivo formando camadas ou leito. Este leito é então submetido ao movimento de pulsação de um fluido (geralmente água) resultando no seguinte:

- as partículas de maior peso específico encaminham para o fundo do leito, passando através das aberturas do crivo e são recolhidas nas calhas do concentrado. Deste modo o material fino e pesado é descarregado pelas cubas, através dos “spigots” e o material grosso é descarregado através do transbordo pela comporta regulável; e
- as partículas de menor peso específico (geralmente o rejeito) ficam no topo do leito, sendo descarregadas por transbordo, passando pelos canais laterais e seguindo para as calhas de rejeito. Este fluxo pode ainda alimentar um segundo estágio de jigagem.

O movimento de pulsação caracterizado pela impulsão e sucção. Na impulsão o movimento da corrente fluida é ascendente. Na sucção, o movimento descendente do fluido provoca a compactação do leito.⁽¹⁾

O jigge é um aparelho que obtém melhores resultados quando é alimentado por minérios com faixa granulométrica mais estreita. No caso da operação de Brucutu a alimentação é basicamente compreendida na faixa de $- 8,00 \text{ mm} + 1,00 \text{ mm}$, tomando-se sempre o cuidado de se evitar contaminações com materiais muito finos ($-1,00 \text{ mm}$) ou muito grossos ($+8,00 \text{ mm}$), através do controle da operação de peneiramento anterior.⁽²⁾

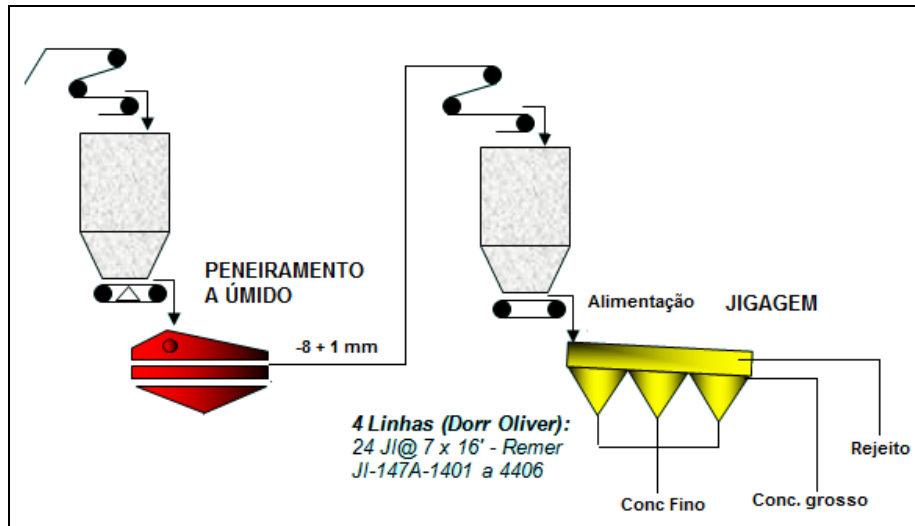


Figura 2 – Fluxograma da operação de Jigagem e Peneiramento a Úmido de Brucutu

1.1.1 Características do leito artificial e abertura do crivo

São acrescentados às camadas de partículas do minério sobre o leito do jig, outros tipos de partículas denominadas de leito artificial, cuja principal característica é o peso específico. Logo, este valor deve estar abaixo do peso específico dos minerais de maiores densidades (concentrado) e acima do peso específico dos minerais mais leves (rejeito). Seu tamanho deve estar compreendido entre duas a três vezes a abertura do crivo. Na prática, é comum utilizar-se esferas de aço para compor este leito artificial. No caso da operação de Brucutu é comum utilizar-se esferas de aço com dimensões que variam entre 15 mm a 16 mm, e abertura do crivo de 8 x 25 mm. A Figura 3 evidencia esta condição.



Figura 3 – Leito artificial constituído de esferas de aço e crivo de suporte do leito da jigagem de Brucutu (Fonte: Arquivo de fotos da jigagem de Brucutu).

É importante observar que enquanto as partículas do leito artificial são duas a três vezes maiores que a abertura do crivo, as do minério devem ser de duas a três vezes menores. Isto faz com que o leito artificial permaneça estacionário na câmara de jigagem, sustentado pelo crivo. Devido a isto, é comum que a expressão “espessura do leito” se refira ao número de partículas no leito artificial.

1.1.2 Regulagem da abertura da comporta

O grau de abertura da comporta localizada na extremidade da descarga do equipamento determina a quantidade de material que é recuperado ou "desviado"

para a calha de rejeitos. De modo geral, se aumentada a abertura da comporta, diminui-se a quantidade de material desviado para o canal lateral de rejeito, aumentando-se a recuperação mássica do processo. Por outro lado, se o grau de abertura é diminuído, maior é a quantidade da massa direcionada para as calhas de rejeito e menor a recuperação do processo. A Figura 4 mostra detalhe da comporta de um jigüe.



Figura 4 – Foto em detalhe da comporta de um jigüe.

O grau de regulação da comporta é uma das principais variáveis operacionais da jigagem. A partir dele pode-se definir a recuperação mássica e qualidade dos produtos conforme as necessidades da Usina.

1.1.3 Mecanismos de separação

- *Sedimentação retardada*: o efeito da sedimentação retardada é obtido através de um aumento na densidade do meio separador. No jigüe, este aumento pode ser obtido através do leito artificial e pelas próprias partículas do minério. Sabe-se, entretanto, que existem flutuações naturais nas características físicas dos minérios. Assim, é mais vantajoso que o controle da densidade do mesmo seja feito, predominantemente, pela quantidade de partículas que irão compor o leito artificial, cujas características físicas são constantes. Acrescente a isto o fato deste leito ser fixo, como discutido anteriormente.
- *Aceleração diferencial*: o efeito da aceleração diferencial ou inercial, no jigüe é obtido fazendo-se com que a frequência do movimento de pulsação seja grande, ou seja, o intervalo de tempo entre uma sucção e uma impulsão é pequeno. Assim, quando as partículas estão se sedimentando (na sucção), antes que elas atinjam suas velocidades terminais, elas são jogadas para cima (na impulsão). Pode-se dizer, portanto, que a alta frequência de pulsos em um jigüe faz com que as partículas tenham um comportamento que se assemelha mais às suas acelerações iniciais do que às suas velocidades terminais, resultando em uma separação onde o fator densidade predomina.
- *Consolidação intersticial*: a consolidação intersticial no jigüe é provocada pela compactação do leito e pode ser controlada de duas maneiras: espessura do leito e/ ou uma sucção intensa. A sucção, por sua vez, é controlada pela vazão de água de operação prevalecendo a regra: “quanto maior a vazão de água, maior a impulsão e menor a sucção.”

A Figura 5 ilustra estes três mecanismos:

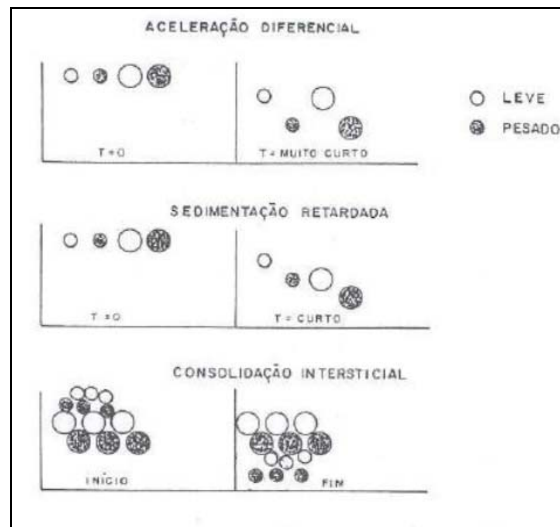


Figura 5 – Mecanismos de separação da jigagem.⁽³⁾

2 OBJETIVOS

Determinar malha de controle para operação da jigagem de Brucutu utilizando-se correlações entre a recuperação mássica e qualidade dos produtos através da variação do grau de abertura de comporta do concentrado grosso.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, cada jigge foi alimentado com taxa de aproximadamente 70 t/h, mantendo os demais parâmetros normais de operação, como se pode observar na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros operacionais da jigagem de Brucutu

Descrição	Unidade	Valor por equipamento
Taxa de alimentação	t/h	70,0
Vazão de água	m ³ /h	200,0
Frequencia de pulsação	rpm	180,0
Amplitude média	mm	16
Abertura do crivo	mm	8 x 25
Inclinação longitudinal	grau	6°20'

Posteriormente foi realizada amostragem sistemática, coletando incrementos a cada 10 min, durante 2 horas, dos fluxos de alimentação, concentrado e rejeito, para cada uma das seguintes regulagens de comporta: 25%, 45% e 100%.

Para este primeiro ensaio exploratório, as amostras foram enviadas ao laboratório de análises de Brucutu, onde se determinou as seguintes qualidades apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados dos testes exploratórios

Abertura Comporta	Fluxo	Rec. Mássica (%)	Fe	SiO ₂	P	AL ₂ O ₃	Mn
25%	AL	100,00	59,30	7,02	0,098	2,04	0,109
	CO	59,68	63,44	2,80	0,096	1,86	0,089
	RJ	40,32	53,17	11,76	0,164	3,34	0,149
44%	AL	100,00	59,30	7,02	0,098	2,04	0,109
	CO	74,74	62,50	3,42	0,101	1,93	0,095
	RJ	25,26	49,83	15,50	0,171	3,65	0,157
100%	AL	100,00	59,30	7,02	0,098	2,04	0,109
	CO	99,97	59,30	6,01	0,112	2,15	0,130
	RJ	0,03	46,65	19,04	0,173	3,89	0,186

De forma a se relacionar o grau da abertura das comportas dos jigues com a recuperação mássica e qualidade química dos produtos foi então interpolada as seguintes curvas de correlação, como pode ser visto pela Figura 6.

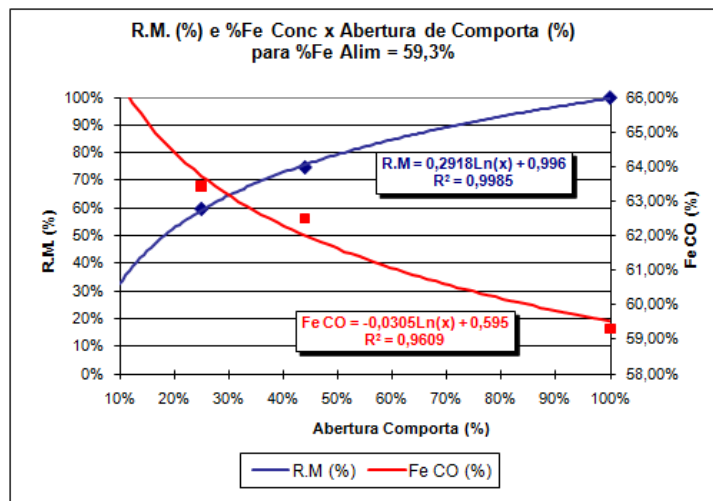


Figura 6 - Curvas de correlação da jigagem para Fe Alim = 59,3%.

A partir dos resultados acima, é possível determinar um primeiro modelo matemático, que correlaciona a variável operacional %AC com a recuperação mássica.

A seguinte função de correlação pode ser, portanto assim definida:

$$RM = 0,2918 \times \ln(AC) + 0,996$$

(Eq. 1)

Onde:

RM = recuperação mássica da jigagem em %.

AC = grau de abertura média de comporta em %.

Para a determinação das correlações entre as qualidades dos produtos, pode-se observar a partir da interpolação dos dados de teores de Fe no concentrado, que uma equação de regressão do tipo logarítmica é sugerida:

$$Fe Co = -0,0305 \times \ln(AC) + 0,595$$

(Eq. 2)

Onde:

$Fe\ Co = Fe\ no\ concentrado\ em\ \%$

$AC = grau\ de\ abertura\ média\ de\ comporta\ em\ \%$

Assim, considerando-se AC igual a 100% nas duas primeiras equações tem-se que, para a equação 1, RM é igual a 0,996 ou 99,6%, ou ainda, praticamente igual a 100%.

Da mesma forma, para a equação 2, tem-se que quando $AC = 100\%$, o $Fe\ Co$ é igual a 0,595 ou 59,5%, valor este muito próximo ao teor de Fe na Alimentação (59,3%).

Os cálculos anteriores remetem ao significado físico esperado. Ou seja, para $\%AC$ igual a 100%, praticamente toda a massa da alimentação é recuperada para o concentrado ($RM = 100\%$), logo, a qualidade do concentrado permanece idealmente igual à da alimentação.

Desta forma, pode-se inicialmente determinar que, o último termo da equação 2 é igual ao próprio teor de Fe na Alimentação multiplicado por um determinado *viés*, ou seja, considerando-se um teor de Fe na alimentação igual a 59,3% a mesma equação pode ser escrita da seguinte maneira:

$$Fe\ Co = -0,0305 \times \ln(AC) + Fe\ Alim \times 1,0034$$

(Eq. 3)

Onde:

$Fe\ Alim = \% Fe\ na\ alimentação$

Os primeiros ensaios exploratórios induzem que os teores de Fe no concentrado da jigagem variam através de correlação logarítmica com o grau de abertura da comporta e com o teor de Fe na alimentação.

A Figura 7 e Tabela 3 apresentam levantamento estatístico realizado a partir do banco de dados do controle operacional de Brucutu para qualidades diárias de teores de Fe na alimentação da jigagem.⁽⁴⁾

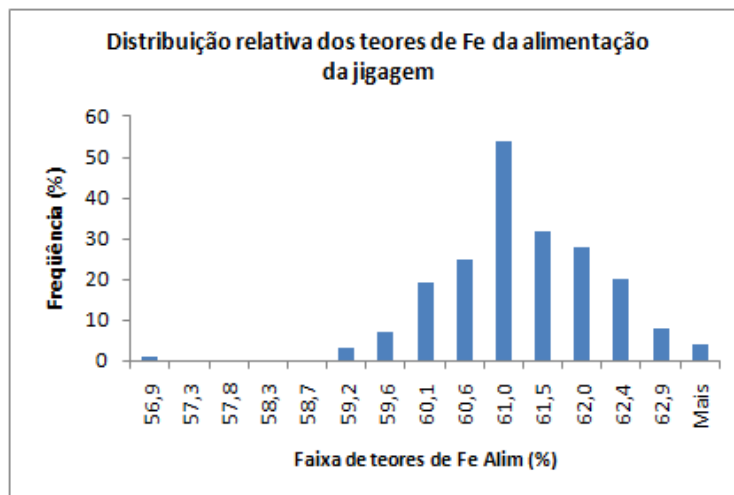


Figura 7 – Distribuição de frequência para teores de Fe na alimentação da jigagem.

Tabela 3 – Resumo estatístico dos teores de Fe na alimentação da jigagem

<i>Resumo estatístico</i>	
Média	61,02
Erro padrão	0,07
Mediana	60,96
Desvio padrão	0,92
Variância	0,86
Curtose	1,38
Assimetria	-0,35
Intervalo	6,48
Mínimo	56,87
Máximo	63,35
Soma	12265,12
Contagem	201

Diante dos resultados anteriores, decidiu-se definir os seguintes valores inteiros para os teores de Fe da alimentação considerando para cada um, intervalos de variação de +/- 0,5%, como apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 – Definição dos valores centrais de teor de Fe

Fe Alim (%)	Fe min (%)	Fe Max (%)	Frequencia (%)
59	58,50	59,50	4%
60	59,50	60,50	22%
61	60,50	61,50	45%
62	61,50	62,50	25%
63	62,50	63,50	6%

Os dados referentes a cada intervalo foram então filtrados e, conforme indicado nos ensaios exploratórios, foram interpoladas curvas de correlação logarítmica para cada valor central. As funções geradas deverão, portanto serem aplicadas dentro de cada faixa de variação (Figura 7).

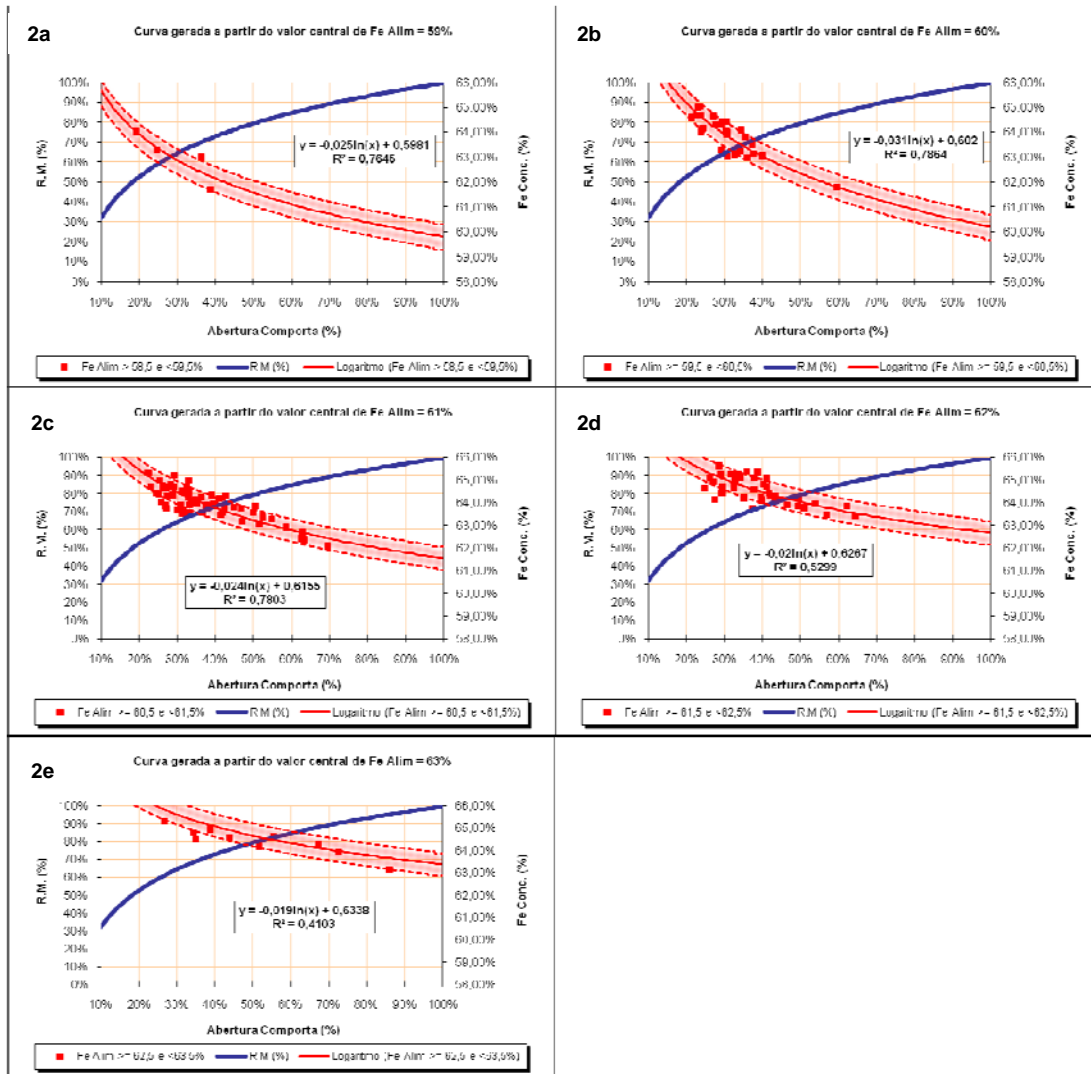


Figura 7 - Curvas geradas a partir de valores centrais de Fe na alimentação.

4 RESULTADOS

Nos primeiros ensaios exploratórios foi obtida uma função através de regressão logarítmica entre os dados de recuperação mássica e grau de abertura de comporta, obtendo-se bom grau de correlação. Nesta mesma etapa foi verificado que os teores de Fe no concentrado e Fe na alimentação também se correlacionavam a partir do grau de abertura de comporta, sobre uma tendência logarítmica.

Assim, com as correlações anteriormente geradas para cada valor central de teor de Fe na alimentação, é possível calcular o viés do 2º termo de cada equação. Deste modo podem-se obter as seguintes funções, definidas em cada faixa de variação proposta, apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Funções de correlação geradas para cada faixa de variação de teores de Fe na alimentação da Jigagem

Intervalo	Faixa de variação	Função	R ²
1	58,5 ≤ %Fe Alim < 59,5	Fe CO = -0,025 x ln(AC) + Fe Alim x 1,0137	0,8
2	59,5 ≤ %Fe Alim < 60,5	Fe CO = -0,031 x ln(AC) + Fe Alim x 1,0030	0,8
3	60,5 ≤ %Fe Alim < 61,5	Fe CO = -0,024 x ln(AC) + Fe Alim x 1,0090	0,8
4	61,5 ≤ %Fe Alim < 62,5	Fe CO = -0,020 x ln(AC) + Fe Alim x 1,0110	0,5

O modelo matemático pode ser finalmente consolidado através da elaboração do Ábaco Operacional (Figura 8), envolvendo as seguintes variáveis: recuperação mássica (RM (%)), teor de Fe no concentrado (Fe CO (%)), teor de Fe na alimentação (Fe AL (%)) e grau de abertura médio da comporta (AC (%)).

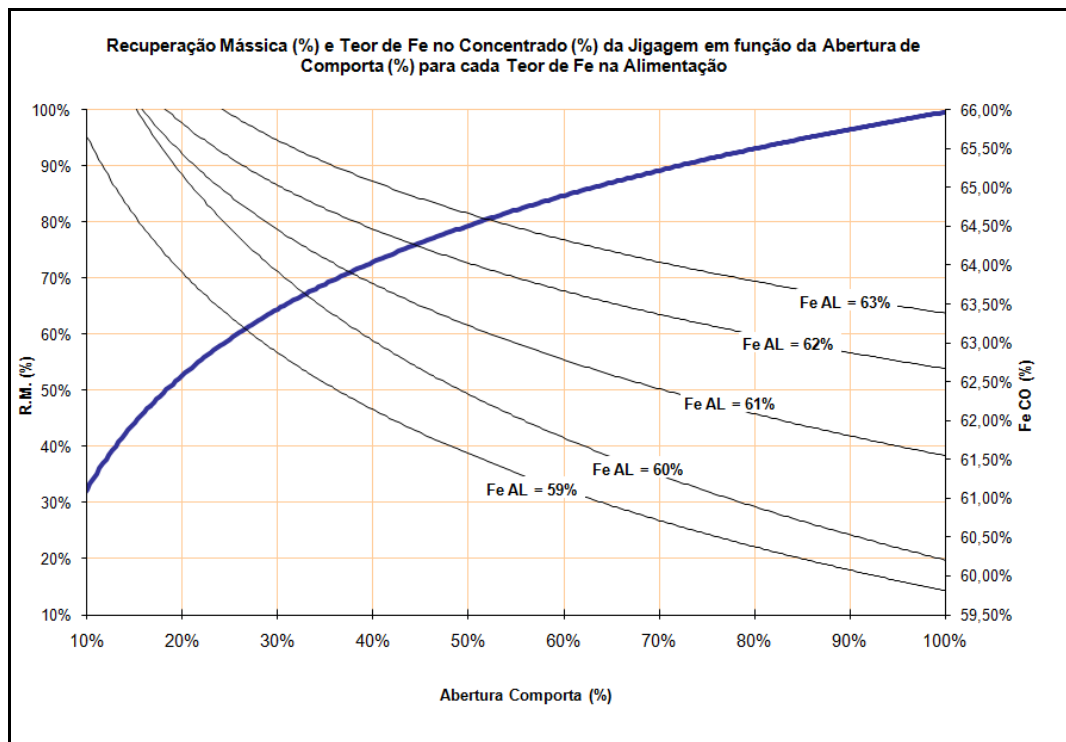


Figura 8 – Ábaco operacional da jigagem de Brucutu.

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

As análises e testes realizados na jigagem de Brucutu envolveram as seguintes variáveis: recuperação mássica, teores de Fe no concentrado e Fe na alimentação e grau de abertura da comporta.

A partir do levantamento estatístico do banco de dados histórico da usina, pôde-se determinar um modelo matemático envolvendo todas as variáveis supracitadas através da elaboração de um ábaco operacional. Este modelo envolve diversas funções logarítmicas para cada faixa de teores de Fe na alimentação a partir de diferentes graus de abertura de comporta.

Desta maneira, se torna possível controlar e prever as condições operacionais da jigagem, e conseqüentemente, otimizar o controle de qualidade e produção da Usina de Brucutu.



Agradecimentos

A toda equipe VALE que apoiou e esteve presente na execução dos testes e análises. Principalmente a equipe das gerências GAEHS, GADMF e GAUBS que estiveram lado a lado para o alcance do êxito deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Valadão, George Eduardo Sales; Araújo, Armando Correa, organizadores. Introdução ao Tratamento de Minérios, Belo Horizonte, Editora UFMG, 2007
- 2 Treinamento de Jigagem; Mina de Brucutu; São Gonçalo do Rio Abaixo, 2009
- 3 Lins, F.A. F.; Luz, A. B.; Tratamento de minérios, CETEM / MCT, 4ª Ed., Cap. 6, Rio de Janeiro, 2004
- 4 Relatórios de produção e qualidade da jigagem; Mina de Brucutu; São Gonçalo do Rio Abaixo, 2009 – 2010.