

**GUILHERME COUTINHO MARRA**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE CIRCUITO DE MOAGEM COM  
MOINHO DE BOLAS. ESTUDO DE CASO DA USINA DE JACOBINA**

**São Paulo**

**2017**

**GUILHERME COUTINHO MARRA**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE CIRCUITO DE MOAGEM COM  
MOINHO DE BOLAS. ESTUDO DE CASO DA USINA DE JACOBINA**

Trabalho de Formatura em Engenharia de  
Minas do curso de graduação do  
Departamento de Engenharia de Minas e  
de Petróleo da Escola Politécnica da  
Universidade de São Paulo.

Orientador: Prof. Dr. Homero Delboni Jr.

**São Paulo  
2017**

TF-2017  
M348m

Sysno 2880862

2

H2017k

DEDALUS - Acervo - EPMI



31700010040

Catálogo-na-publicação

Marra, Guilherme

Modelagem e simulação de circuito de moagem com moinho de bolas.  
Estudo de caso da usina de Jacobina. / G. Marra -- São Paulo, 2017.  
33 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São  
Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo.

1. Cominuição 2. Moagem 3. Simulação 4. Jacobina I. Universidade de São  
Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo  
II.t.

## RESUMO

A modelagem de equipamentos de beneficiamento permite a realização de simulações de circuitos nas mais variadas condições de operação, desde alteração de parâmetros operacionais, até a adição de novos equipamentos no circuito. Tais simulações ajudam a prever as características dos produtos do circuito com a vantagem de dispensar ensaios e numerosas amostragens para cada uma das condições simuladas.

O foco deste trabalho são os modelos de moinhos de bolas e ciclones, especificamente o *Perfect Mixing Model* ou Modelo do Misturador Perfeito para moinhos de bolas, e o Modelo de Nageswararao para ciclones.

Este trabalho tem por objetivo o estudo das técnicas de modelagem, e análise dos efeitos da alteração de variáveis de processo tanto na moagem quanto na ciclonagem em um estudo de caso, a fim de otimizar o processo com duas finalidades distintas. A primeira é a de aumento da taxa de alimentação do circuito de moagem mantendo o  $P_{80}$  de corte do ciclone. A segunda é a diminuição do  $P_{80}$  de corte do ciclone mantendo a vazão de alimentação do circuito constante.

Palavras-Chave: Cominuição, moagem, modelagem, simulação.

## ABSTRACT

Modelling mineral processing equipments allows the simulation of circuits in a wide range of operating conditions, either altering operational parameters or adding new equipments and diverting streams. Those simulations help to predict the products' attributes, with the advantage of not needing numerous sampling campaigns for each simulated condition.

The focus of this work are ball mill and hydrocyclones models, notably the Perfect Mixing Model for ball mills and Nageswararao Model for hydrocyclones.

This work's objective is the study of modelling techniques and analysis of the effects of altering process variables on milling and classification in a case study, with the goal of optimizing the circuit in two distinct cases. The first one is to increase the solids feed into the circuit without increasing the  $P_{80}$  of the cyclone. The second one is to decrease the  $P_{80}$  of the cyclone without reducing the circuit solids feed rate.

Keywords: Comminution, grinding, modelling, simulation

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Especificações do moinho da Linha 1 da usina de Jacobina.....	18
Tabela 2: Especificações dos ciclones da Linha 1 da usina de Jacobina.....	19
Tabela 3: Efeitos da alteração da porcentagem de sólidos na alimentação do ciclone .....	22
Tabela 4: Efeitos da alteração do diâmetro do apex do ciclone.....	23
Tabela 5: Efeitos da alteração do diâmetro do vortex do ciclone .....	24
Tabela 6: Efeitos da alteração do diâmetro máximo de bolas do moinho .....	25
Tabela 7: Efeitos da alteração do grau de enchimento do moinho.....	26
Tabela 8: Efeitos da alteração da porcentagem de sólidos do moinho .....	27
Tabela 9: Descrição dos cenários simulados.....	28
Tabela 10: Resultados das simulações de otimização.....	29

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>8</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>10</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>11</b>
3.1	Moagem	11
3.1.1	Modelo do Balanço Populacional	11
3.1.2	Modelo do Misturador Perfeito	13
3.2	Ciclonagem	14
3.2.1	Curvas de Partição	15
3.2.2	Modelo de Nageswararao	15
3.2.3	Operação em cordão	17
<b>4</b>	<b>CIRCUITO DE JACOBINA</b>	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>21</b>
5.1	Alteração de parâmetros do ciclone	22
5.1.1	Alterações na porcentagem de sólidos do ciclone	22
5.1.2	Alterações no Apex	23
5.1.3	Alterações no vortex	24
5.2	Alteração de parâmetros do moinho	25

<b>5.2.1</b>	<b>Alterações no diâmetro máximo de bolas</b>	<b>25</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Alterações no grau de enchimento</b>	<b>26</b>
<b>5.2.3</b>	<b>Alterações na porcentagem de sólidos do moinho</b>	<b>26</b>
<b>5.3</b>	<b>Otimizações</b>	<b>27</b>
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>30</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>32</b>



## 1 INTRODUÇÃO

A cominuição é parte fundamental da indústria mineral. Alguns bens minerais são vendidos em granulometrias especificadas, como é o caso dos agregados para construção civil. Outros devem passar por processos de separação, em que o mineral de minério é separado dos outros minerais de ganga que estão presentes na rocha processada. Para que o processo de separação seja eficiente, o minério moído deve estar dentro de uma faixa de tamanho adequada tanto para o método de separação, como para a liberação dos minerais presentes. Para assegurar que as partículas estarão de acordo com as especificações estipuladas, geralmente é necessário serem processadas em circuitos de britagem, que reduzem o material de tamanhos da ordem de 1 metro até dezenas de milímetros, e de moagem, que reduz as partículas até centenas ou dezenas de micrômetros. (CHAVES, 2006)

Processos de cominuição apresentam alto consumo energético. A média de consumo de energia de usinas de beneficiamento de cobre é de 2,2 kWh/t para a britagem, 11,6 kWh/t para a moagem e 2,6 kWh/t para a flotação (WILLS, 2008). O custo da moagem representa cerca de 40% dos custos totais do processamento de minas de cobre, desde sua saída da mina até o embarque do concentrado (CHAVES, 2006).

Devido à maior contribuição da moagem para o alto custo energético do processamento de minérios, garantir que a operação seja o mais eficiente possível é fundamental para garantir rentabilidade.

Diante da necessidade de melhoria, a modelagem se apresenta como uma ferramenta útil de otimização de circuitos, que permite simular alterações em parâmetros dos equipamentos, adição ou remoção de equipamentos e mudanças de fluxos entre diferentes equipamentos. A modelagem pode ser aplicada para os mais diferentes tipos de equipamentos, como moinhos SAG, moinhos de barras, moinhos de bolas, ciclones, peneiras, entre outros.

A aplicação da modelagem em circuitos industriais é uma prática bem estabelecida, que conta com diversos estudos de caso onde simulações apontaram claras oportunidades de melhora, como descrito por Bergerman (2009) em que o circuito da mina de Sossego é simulado com modificações no SAG, na peneira vibratória, no moinho de bolas e no ciclone, obtendo ganhos significativos na vazão de alimentação, mostrando inclusive a possibilidade de que a adição de um segundo estágio de ciclones após os moinhos de bolas permitiria a desativação de um dos moinhos de bolas sem perdas na vazão de alimentação da usina, devido à diminuição da carga circulante, o que levaria a uma economia substancial de energia.

Outro caso interessante é o observado em Barros et al. (2017), onde a modelagem foi aplicada a uma usina de processamento de minério fosfático, com duas linhas paralelas. No caso base, a recuperação metalúrgica da usina era de 23,7%. A sugestão para melhorar a recuperação metalúrgica foi o desvio do rejeito *rougher* da linha A para o moinho de barras da linha B. A recuperação metalúrgica da simulação de tal modificação aumentou para 31%. Depois de aplicadas as mudanças sugeridas no circuito, foi obtida uma recuperação metalúrgica de 30,8%, muito próxima do valor simulado.

## 2 OBJETIVOS

O principal objetivo do presente trabalho é simular o circuito de moagem de Jacobina, de forma a estabelecer cenários para obtenção de melhoria de desempenho do processo integrado.

Adquirir conhecimentos teóricos e práticos da assim denominada modelagem matemática constitui-se também em objetivo deste trabalho, de forma que o autor possa executar as simulações estipuladas. Como este assunto não é abordado em detalhe na disciplina específica ministrada na graduação, este trabalho é considerado um aprofundamento na área de cominuição.

Outros objetivos secundários deste estudo são também:

Estudar o Modelo do Misturador Perfeito (*Perfect Mixing Model* ou *PMM*) para moinhos de bolas, e o Modelo de Nageswararao para ciclones, com o objetivo de entender como funcionam, suas aplicações e limitações.

Analisar a interação entre os dois modelos através da simulação da usina da mina de Jacobina, que possui duas linhas de moagem com um moinho de bolas e um ciclone em cada linha. A análise foi feita através da variação de parâmetros de operação do ciclone e do moinho individualmente, com simulação do circuito e análise dos efeitos.

A partir dos resultados das simulações preliminares, sugerir alterações dos parâmetros do circuito e simulá-los, para otimizá-lo de acordo com dois cenários. No primeiro cenário, o objetivo foi aumentar a taxa de alimentação do circuito, e no segundo, obter um produto de granulometria mais fina.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Moagem

A moagem geralmente é feita em moinhos de carga cadente, que tem formato cilíndrico, e giram em torno do eixo, posicionado na horizontal. Os moinhos são carregados com corpos moedores, que são, normalmente, barras ou bolas de aço. O circuito clássico de cominuição utiliza um moinho de barras em circuito aberto, seguido por um moinho de bolas em circuito fechado com ciclones que recirculam o material grosso de volta ao moinho (CHAVES, 2006).

A moagem é utilizada para reduzir o tamanho de partículas abaixo de  $\frac{3}{4}$ " (19,1 mm), para aumentar a liberação dos minerais, adequar às especificações granulométricas industriais, facilitar o transporte do minério em polpa por minerodutos, adequação do tamanho para processos subsequentes como a pelotização do minério de ferro ou a flotação. (CHAVES, 2006).

##### 3.1.1 Modelo do Balanço Populacional

O texto desta seção é baseado em Napier-Munn et al. (1996).

O modelo do balanço populacional (*Population Balance Model*) – MBP assume que a quantidade de material descarregada do moinho de uma faixa granulométrica é proporcional à massa daquela faixa dentro do moinho. A constante de proporcionalidade é diferente para cada faixa granulométrica, sendo denominada taxa de quebra. Portanto, para cada fração granulométrica "i" tem-se:

$$m_i = k_i s_i$$

Onde:

$m_i$  = massa moída da fração i (t/h)

$k_i$  = taxa de quebra da fração i ( $h^{-1}$ )

$s_i$  = massa da fração i dentro do moinho (t)

Essa premissa apresenta a vantagem de simplificar o modelo, mas limita sua utilização para faixas restritas de operação.

O MBP baseia-se no balanço de massas de cada fração granulométrica, de forma que:

$$\begin{aligned} \text{Alimentação} + \text{Quebra das frações maiores para a fração considerada} \\ = \text{Produto} + \text{Quebra da fração considerada} \end{aligned}$$

Além da taxa de quebra, é necessário definir a função de quebra,  $b_{ij}$ , que representa a porcentagem da fração  $j$  que vai para a fração  $i$  após um evento de quebra. Portanto a equação do balanço de massa fica:

$$f_i + \sum_j^{i-1} b_{ij} k_j s_j = p_i + k_i s_i$$

Onde:

$f_i$  = vazão da fração  $i$  na alimentação (t/h)

$b_{ij}$  = parcela da fração  $j$  que aparece na fração  $i$  após evento de quebra

$k_i$  = taxa de quebra da fração  $i$  ( $h^{-1}$ )

$s_i$  = massa da fração  $i$  dentro do moinho (t)

$p_i$  = vazão da fração  $i$  no produto (t/h)

A função  $b_{ij}$  é uma matriz cujos elementos acima da diagonal principal, ou seja,  $j > i$ , são nulos, pois após um evento de quebra a partícula não pode aparecer em uma faixa granulométrica maior que a inicial.

Portanto, conhecida a função quebra e as massas da fração  $i$  na alimentação, na carga do moinho e no respectivo produto, é possível estimar os parâmetros  $k_i$ . Porém, é muito difícil a determinação precisa das massas das diferentes frações da carga interna do moinho, pois requer ensaios de tempo de residência dos sólidos no interior do moinho (NAPIER-MUNN, 1996). O *Perfect Mixing Model* descrito a seguir dispensa essa determinação, tornando sua utilização mais simples.

### 3.1.2 Modelo do Misturador Perfeito

O texto desta seção também é baseado em Napier-Munn et al. (1996).

O *Perfect Mixing Model* (PMM) introduz a premissa de que o conteúdo do moinho está perfeitamente misturado e, portanto, o produto está relacionado com a carga de minério dentro do moinho por uma taxa de descarga  $d_i$  ( $h^{-1}$ ), de forma que:

$$p_i = d_i s_i$$

É importante ressaltar que o PMM foi desenvolvido independentemente do PBM por Whiten (apud DELBONI, 2002b), que em sua derivação da fórmula do PBM denominou a variável  $b_{ij}$  de  $a_{ij}$  e a variável  $k_i$  foi denominada de  $r_i$ . Substituindo na equação do balanço de massa do moinho, obtêm-se:

$$f_i + \sum_{j=1}^{i-1} \left[ \frac{a_{ij} r_j p_j}{d_j} \right] = p_i + \frac{r_i p_i}{d_i}$$

O parâmetro  $r_i/d_i$  pode ser determinado para cada fração granulométrica. No entanto é necessário normalizá-lo, de forma a poder escalonar diferentes equipamentos e/ou diferentes vazões de alimentação. A equação baseada no tempo de residência é descrita a seguir:

$$\frac{r_i}{d_i} = \left( \frac{D^2 L}{4Q} \right) \frac{r_i}{d_i^*}$$

Onde:

D = diâmetro interno do moinho (m)

L = comprimento do moinho interno ao revestimento (m)

Q = vazão volumétrica de alimentação do moinho ( $m^3/h$ )

Com base nos valores  $r_i/d_i^*$  é possível alterar alguns parâmetros da moagem, produzindo fatores de escala, que são multiplicados nos valores de  $r_i/d_i^*$ , a fim de se obter  $(r_i/d_i^*)_{SIMULADO}$ . Com os valores simulados, calculam-se os novos valores  $p_i$  que

correspondem ao produto do moinho simulado. A equação que descreve a obtenção do parâmetro  $(r_i/d_i^*)_{SIMULADO}$  é:

$$\left(\frac{r_i}{d_i^*}\right)_{SIM} = \left(\frac{r_i}{d_i^*}\right)_{FIT} \left(\frac{D_{SIM}}{D_{FIT}}\right)^{0,5} \left(\frac{1 - LF_{SIM}}{1 - LF_{FIT}}\right) \left(\frac{LF_{SIM}}{LF_{FIT}}\right) \left(\frac{C_{s\ SIM}}{C_{s\ FIT}}\right) \left(\frac{WI_{SIM}}{WI_{FIT}}\right)^{0,8}$$

Onde:

D = Diâmetro do moinho (m)

LF = Grau de enchimento do moinho

C<sub>s</sub> = Fração da velocidade crítica (entre 0,55 e 0,8)

WI = Work Index do minério (kWh/t)

SIM = Índice que identifica o valor da variável na simulação

FIT = Índice que identifica o valor da variável no caso base.

### 3.2 Ciclonagem

A ciclonagem é uma operação de classificação usada para fechar o circuito com o moinho de bolas, garantindo que o produto do circuito estará no tamanho estipulado, enquanto o produto grosseiro retornará ao moinho.

O funcionamento de ciclones é baseado na diferença da velocidade de sedimentação entre partículas num campo centrífugo. No movimento espiral para baixo que o fluido realiza no interior do ciclone, as partículas com maior velocidade de sedimentação tendem a se encaminhar para as paredes do ciclone, fluindo em direção ao *apex*. As partículas com menor velocidade de sedimentação são carregadas pelo vórtice, ou fluxo ascendente de ar em direção ao *vortex* (WILLS, 2008).

Os modelos matemáticos de ciclones permitem a modificação dos parâmetros de operação para estimar as características do produto no *overflow* e da carga circulante no *underflow*, com o objetivo de otimizar a moagem.

### 3.2.1 Curvas de Partição

A partição de um ciclone é definida como a parcela de sólidos da alimentação que se encaminha para o *underflow*. A curva de partição experimental é construída a partir do cálculo da partição de cada uma das faixas granulométricas. Um importante parâmetro da curva de partição é o  $d_{50}$ , que representa o diâmetro de partícula com partição experimental igual a 50%, ou seja, tem a mesma probabilidade de ser encaminhado ao *overflow* e ao *underflow*.

A curva de partição não passa pela origem, devido à presença de finos no *underflow*, fenômeno chamado de curto-circuito ou *by-pass*. O *by-pass* ocorre devido à menor resistência que partículas mais finas têm ao arraste da água. Baseado neste fenômeno, Kelsall (1953 apud WILLS, 2008) propôs que de cada fração granulométrica seja subtraída a partição de água do ciclone, a fim de obter a curva de partição corrigida. A equação para obter a partição corrigida é:

$$P_{ci} = \frac{P_{ri} - R_f}{1 - R_f}$$

Onde:

$P_{ci}$  = Partição corrigida da fração  $i$

$P_{ri}$  = Partição real da fração  $i$

$R_f$  = Partição de água para o *underflow*

O parâmetro  $d_{50c}$  da curva de partição corrigida é análogo ao  $d_{50}$  da curva experimental. No modelo de Nageswararao utiliza-se o  $d_{50c}$ .

### 3.2.2 Modelo de Nageswararao

O modelo de Nageswararao engloba quatro equações que definem parâmetros dos produtos do ciclone (*overflow* e *underflow*) com base em suas características geométricas, pressão de alimentação e características da polpa. O modelo é baseado na premissa de que a curva de partição independe das condições de operação do ciclone (DELBONI, 2002a). Para aplicar o modelo são necessárias amostragens para determinar a densidade do minério, a vazão, a granulometria e a porcentagem de



sólidos da alimentação, *overflow* e *underflow*. A partir desses dados é possível calcular a densidade da polpa, as recuperações de água e de polpa, assim como criar a curva de partição corrigida e obter o  $d_{50c}$ , que são usados para calibrar as constantes  $K_{D0}$ ,  $K_{W1}$ ,  $K_{V1}$  e  $K_{Q0}$  do modelo.

As equações do modelo de Nageswararao são:

$$d_{50c} = K_{D0} \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{-0,5} \theta^{0,15} \left( \frac{L_c}{D_c} \right)^{0,2} D_c^{0,35} \left( \frac{D_o}{D_c} \right)^{0,52} \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^{-0,047} \lambda^{0,93} \left( \frac{P}{\rho_p g D_c} \right)^{-0,22}$$

$$R_f = K_{W1} \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{-0,5} \theta^{-0,24} \left( \frac{L_c}{D_c} \right)^{0,22} \left( \frac{D_o}{D_c} \right)^{-1,19} \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^{2,40} \lambda^{0,27} \left( \frac{P}{\rho_p g D_c} \right)^{-0,53}$$

$$R_v = K_{V1} \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{-0,25} \theta^{-0,24} \left( \frac{L_c}{D_c} \right)^{0,22} \left( \frac{D_o}{D_c} \right)^{-0,94} \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^{1,83} \left( \frac{P}{\rho_p g D_c} \right)^{-0,31}$$

$$Q = K_{Q0} \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{0,45} \theta^{-0,1} \left( \frac{L_c}{D_c} \right)^{0,2} D_c^2 \left( \frac{D_o}{D_c} \right)^{0,68} \left( \frac{P}{\rho_p} \right)^{0,5}$$

Onde:

$D_i$  = Diâmetro do *inlet* (m)

$D_o$  = Diâmetro do *vortex* (m)

$D_u$  = Diâmetro do *apex* (m)

$D_c$  = Diâmetro do hidrociclone (m)

$L_c$  = Comprimento da seção cilíndrica (m)

$\theta$  = Ângulo da seção cônica (graus)

$P$  = Pressão na entrada do ciclone (kPa)

$\rho_p$  = Densidade da polpa da alimentação ( $t/m^3$ )

$g$  = Aceleração da gravidade ( $9,81 m/s^2$ )

$Q_f$  = Vazão volumétrica da polpa ( $m^3/h$ )

$R_f$  = Recuperação de água para o *underflow* (%)

$R_v$  = Recuperação de polpa para o *underflow* (%)

$K$  = Constantes do modelo

$\lambda$  = Fator de correção em razão da diferença de velocidade terminal livre e velocidade de sedimentação. Dado em função da concentração volumétrica de sólidos ( $C_v$ ) como:

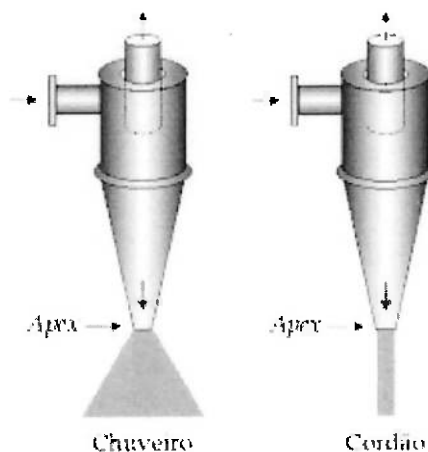
$$\lambda = \frac{10^{1,82C_v}}{8,05[1 - C_v]^2}$$

Determinadas as constantes K, pode-se alterar os parâmetros do ciclone para analisar as características do *overflow* e *underflow* simulados (NAPIER-MUNN, 1996)

### 3.2.3 Operação em cordão

A operação em cordão ocorre quando a vazão volumétrica de sólidos no *underflow* atinge ou ultrapassa certo valor. A operação de cordão é prejudicial à classificação, pois altera a dinâmica dos fluxos dentro do ciclone, enviando partículas grossas ao *overflow*, podendo aumentar o  $d_{50c}$  entre 5 e 10 vezes (DELBONI, 2002a). A Figura 1 ilustra como ocorre a descarga em chuva, que é a situação adequada e compara com a descarga em cordão.

Figura 1: Comparação entre operação em Chuveiro e Cordão em ciclones



Fonte: SAMPAIO, J. A.; OLIVEIRA, G. P.; SILVA, A. O. (2007). Adaptada.

É importante mencionar que o simulador utilizado neste trabalho, JKSimMet versão 6.1 prevê casos de operação em cordão. No entanto nestes casos não é possível simular com precisão o produto do *overflow*. Por este motivo devem ser feitos ajustes, de forma a eliminar a operação em cordão para que os resultados sejam confiáveis.

#### 4 CIRCUITO DE JACOBINA

A usina da mina de Jacobina processa nominalmente 237,7 t/h de minério e possui dois circuitos fechados de moagem em paralelo, com um moinho de bolas e dois ciclones em cada linha. Neste trabalho a linha estudada, designada de Linha 1, processa 67,7 t/h de minério e é equipada com um moinho de 13' de diâmetro e 20,5' de comprimento e dois ciclones Krebs GMAX26, sendo apenas um deles em operação. A Tabela 1<sup>1</sup> mostra com mais detalhes as dimensões e parâmetros operacionais do moinho da Linha 1 da usina de Jacobina.

Tabela 1: Especificações do moinho da Linha 1 da usina de Jacobina

Moinho 01			
Variável	Valor	Unidade	Observações
Diâmetro nominal	13	pés	
Diâmetro interno ao revestimento	12,5	pés	3,81m
Comprimento nominal	20,5	pés	
Comprimento interno ao revestimento	19,5	pés	5,94m
Potência do motor	950 a 1200	kW	
Tipo de descarga	Diafragma		
Velocidade de rotação	15,9	rpm	72,6% da velocidade crítica
Velocidade crítica	21,9	rpm	
Tipo de revestimento	Borracha com incherτος de polimet		
Tamanho de bola máximo	3"		0,0762m
Grau de enchimento	27 a 29	%	

A Tabela 2<sup>1</sup> mostra com mais detalhes os parâmetros dos ciclones da Linha 1 da usina de Jacobina.

<sup>1</sup> Os dados dos equipamentos utilizados na usina de Jacobina foram fornecidos por HDA Serviços Ltda.

Tabela 2: Especificações dos ciclones da Linha 1 da usina de Jacobina

Ciclones						
Variável	Valor	Unidade	Observações			
Fabricante	Krebs					
Modelo	GMAX26					
Diâmetro nominal	26	"	0,660m			
Diâmetro do vortex	12	"	0,305m			
Diâmetro do apex	6	"	0,152m			
Diâmetro do inlet	60	in²	8,740"	0,222m		
Comprimento da seção cilíndrica	774,9	mm				
Ângulo da seção cônica	20	°				
Número de ciclones no cluster	2					
Número de ciclones em operação	1					

A Figura 2 mostra o fluxograma do circuito de Jacobina, juntamente com o balanço de massas obtido pela HDA Serviços Ltda. para condições consideradas nominais, ou Caso Base do presente trabalho. Nas caixas observa-se a vazão de sólidos, porcentagem de sólidos, vazão de água, vazão volumétrica,  $P_{80}$  e porcentagem passante em 0,106mm para cada fluxo do circuito no caso base.

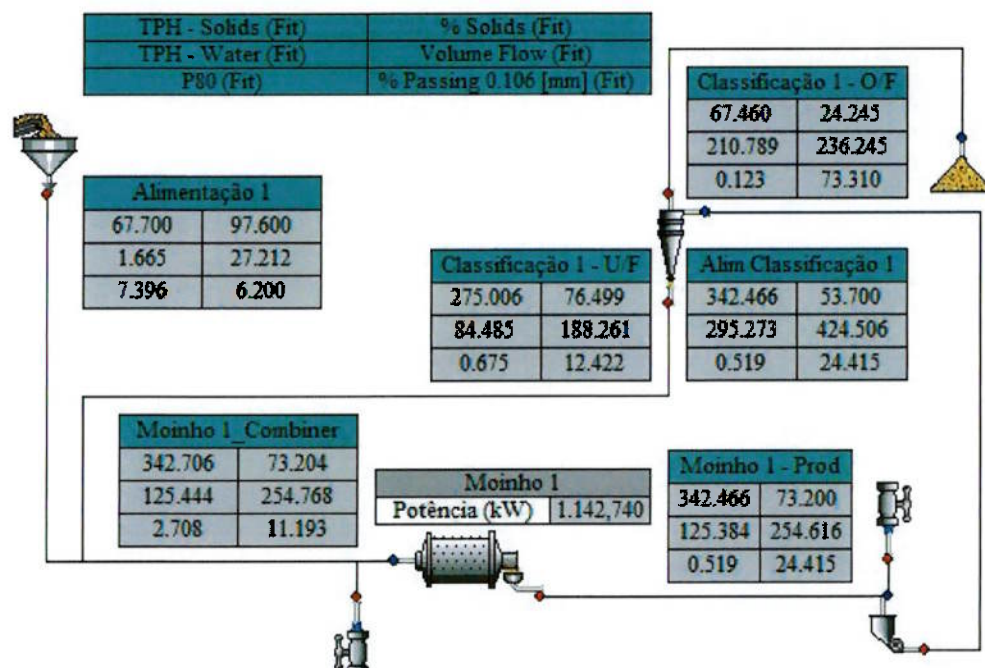


Figura 2: Caso Base do circuito de moagem

Observa-se que no Caso Base, a vazão de alimentação do circuito é de 67,7 t/h e o  $P_{80}$  é de 0,123 mm. Tais valores foram considerados como referências para as simulações conduzidas.

## 5 RESULTADOS

Todas as simulações<sup>2</sup> descritas neste trabalho foram executadas utilizando-se o programa JKSimMet versão 6.0.1 desenvolvido no *Julius Kruttschitt Mineral Research Centre* do JKTech, da Universidade de Queensland, Austrália.

Nas simulações preliminares foram alterados três parâmetros do ciclone, quais sejam, diâmetro do *apex*, diâmetro do *vortex* e porcentagem de sólidos na alimentação do ciclone, bem como três parâmetros do moinho de bolas, grau de enchimento, tamanho máximo de bolas, e porcentagem de sólidos no moinho. Cada uma destas variáveis foi simulada individualmente, de forma a analisar os respectivos efeitos em três diferentes índices de desempenho: carga circulante,  $P_{80}$  do *overflow* do ciclone e eficiência da moagem.

A carga circulante é definida como a razão entre a vazão de sólidos do *underflow* que retorna ao moinho e a vazão nova de alimentação do circuito. O  $P_{80}$  do *overflow* é a malha na qual 80% da massa passa.

A eficiência da moagem aqui adotada é aquela definida por Rowland (1976 apud BERALDO, 1987), definida como a razão entre o WI (*Work Index*) de laboratório (com valor de 17,4 kWh/t<sup>3</sup> para o minério considerado) e o WI operacional, este último calculado de acordo com a seguinte equação.

$$WI_{op} = \frac{P}{10Q \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)}$$

Onde:

$WI_{op}$  = WI operacional (kWh/t)

P = Potência do motor do moinho (kW)

Q = Vazão de sólidos de alimentação nova no circuito (t/h)

$P_{80}$  = tamanho que possui 80% de massa passante no *overflow* (µm)

$F_{80}$  = tamanho que possui 80% de massa passante na alimentação nova (µm)

<sup>2</sup> As amostragens, balanços de massas e calibração dos modelos que possibilitaram a realização das simulações foram feitos pela HDA Serviços Ltda.

<sup>3</sup> Valor fornecido pela HDA Serviços Ltda.

Todas as simulações realizadas causaram algum efeito na vazão de sólidos de alimentação do ciclone e, por consequência, alteraram sua pressão de operação, devido à mudança da vazão volumétrica de polpa. Como a pressão de alimentação do ciclone tem grande influência em sua operação, nas simulações realizadas, esta variável foi mantida próxima do valor do caso base, de 75 kPa, através do controle da porcentagem de sólidos na alimentação do ciclone. Em alguns casos não foi possível restaurar completamente a pressão devido à ocorrência de operação em cordão. Estes casos são destacados a seguir.

### 5.1 Alteração de parâmetros do ciclone

O ciclone instalado no circuito de moagem de Jacobina é da marca Krebs modelo GMAX26 com 26" de diâmetro, diâmetro do *apex* de 6", diâmetro do *vortex finder* de 12", diâmetro equivalente de entrada de 10", operando com pressão de 75 kPa. Os dados do Caso Base foram simulados após a calibração dos modelos, sendo apresentados em conjunto com as alterações.

#### 5.1.1 Alterações na porcentagem de sólidos do ciclone

A Tabela 3 apresenta, além do Caso Base, os efeitos obtidos nos índices selecionados a partir das simulações de duas diferentes porcentagens de sólidos da polpa de alimentação do ciclone. Assim, partindo-se de 53,7% de sólidos do Caso Base, as simulações incluíram operação com 51,7% e 55,7% desta variável.

Tabela 3: Efeitos da alteração da porcentagem de sólidos na alimentação do ciclone

Porcentagem de sólidos na alimentação do ciclone			
Efeitos	Caso Base (53,7%)	55,7%	52,7%
P <sub>80</sub> (mm)	0,123	0,133	0,117
Carga Circulante (t/h)	278	227	347
Pressão Ciclone (kPa)	75	51	115
Eficiência Moagem (%)	80,8	77,3	83,2

O principal efeito observado na Tabela 3 foi que a maior diluição na alimentação do ciclone altera significativamente a pressão de operação, devido a variação da vazão volumétrica da polpa. Portanto, quando se torna necessário ajustar a pressão de operação do ciclone, a alteração da diluição da polpa de alimentação é uma medida efetiva para tal fim.

O aumento da porcentagem de sólidos também aumenta o  $P_{80}$  do *overflow* do ciclone devido à menor pressão operacional, que assim diminui a força centrífuga no interior do ciclone, diminuindo a velocidade de sedimentação das partículas grossas, que acabam arrastadas pela água para o *overflow*. Analogamente, a diminuição da porcentagem de sólidos, diminui o  $P_{80}$  do *overflow* do ciclone, mas aumenta a carga circulante do circuito.

### 5.1.2 Alterações no Apex

A Tabela 4 apresenta, além do Caso Base, os efeitos obtidos nos índices selecionados a partir das simulações de quatro diferentes aberturas de apex do ciclone. Assim, partindo-se de 6" do Caso Base, as simulações incluíram operação com 5", 5,5", 6,3" e 6,7" desta variável.

Tabela 4: Efeitos da alteração do diâmetro do apex do ciclone

Alterações no apex do ciclone					
Efeitos	Caso Base (6")	5,5"	5"	6,3"	6,7"
$P_{80}$ (mm)	0,123	0,125	0,130	0,125	0,128
Carga Circulante (t/h)	278	243	193	284	294
Pressão Ciclone (kPa)	75	64	46	75	75
% Sólidos Ciclone	53,7	52,9	52,7	54,7	56,1
Eficiência Moagem (%)	80,8	80,3	78,5	80,2	79,2

O ciclone em operação já está equipado com o maior apex disponível para o modelo. Para simular o aumento do apex, utilizaram-se tamanhos disponíveis para o ciclone Cavex modelo 650CVX que também possui diâmetro de 26" e possui características similares ao modelo em operação.

Observa-se na Tabela 4 que após a restauração da pressão através da



alteração da porcentagem de sólidos, a aumento do  $P_{80}$  do *overflow* do ciclone nos casos em que se aumentou o *apex*, assim como o aumento da carga circulante. Nos casos em que o *apex* foi reduzido, a carga circulante foi reduzida, mas o  $P_{80}$  aumentou, devido à queda da pressão. Nestes casos a pressão não pôde ser restaurada para 75 kPa pela adição de água na caixa de bomba, pois a simulação previa operação em cordão para pressões acima das obtidas.

A redução da eficiência da moagem observada nestas simulações está diretamente relacionada ao aumento do  $P_{80}$ , visto que a vazão de alimentação do circuito e a potência do moinho não foram alteradas.

### 5.1.3 Alterações no *vortex*

A Tabela 5 apresenta, além do Caso Base, os efeitos obtidos nos índices selecionados a partir das simulações de duas diferentes aberturas de *vortex* do ciclone. Assim, partindo-se de 12" do Caso Base, as simulações incluíram operação com 12,6" e 11,4" desta variável.

Tabela 5: Efeitos da alteração do diâmetro do *vortex* do ciclone

Alterações no <i>vortex</i> do ciclone			
Efeitos	Caso Base (12")	10"	12,6"
$P_{80}$ (mm)	0,123	0,130	0,123
Carga Circulante (t/h)	278	264	279
Pressão Ciclone (kPa)	75	76	75
% Sólidos Ciclone	53,7	57,5	52,9
Eficiência Moagem (%)	80,8	78,5	81,1

O *vortex* instalado no ciclone de Jacobina também estava com a maior dimensão para o modelo utilizado. Para simular o aumento do *vortex* foram utilizadas dimensões do mesmo ciclone usado no aumento do *apex*, o Cavex 650CVX.

A redução do *vortex* em conjunto com a restauração da pressão causa o aumento do  $P_{80}$  e diminuição da carga circulante. O aumento do *vortex* causou pequeno aumento da carga circulante e não produziu efeitos significativos no  $P_{80}$ .

Nota-se aqui o efeito preponderante da porcentagem de sólidos na alimentação do ciclone sobre as alterações de diâmetro de vortex simuladas, uma vez que os efeitos seriam contrários aos obtidos, mediante alterações somente do diâmetro do vortex. À título de exemplo, a diminuição do diâmetro do vortex resultaria em overflow mais fino e carga circulante maior, contrário, portanto, ao resultado listado na Tabela 5

## 5.2 Alteração de parâmetros do moinho

### 5.2.1 Alterações no diâmetro máximo de bolas

A Tabela 6 apresenta, além do Caso Base, os efeitos obtidos nos índices selecionados a partir das simulações de três diferentes tamanhos máximos de bolas adicionadas ao moinho. Assim, partindo-se de 3" do Caso Base, as simulações incluíram operação com 2,5", 2", 3,5" e 4" desta variável.

Tabela 6: Efeitos da alteração do diâmetro máximo de bolas do moinho

Alterações do diâmetro máximo de bolas					
Efeitos	Caso Base (3")	2,5"	2"	3,5"	4"
$P_{80}$ (mm)	0,123	0,112	0,101	0,135	0,146
Carga Circulante (t/h)	278	267	251	288	303
Pressão Ciclone (kPa)	75	77	76	76	79
% Sólidos Ciclone	53,7	52,2	50,5	55,0	56,0
Eficiência Moagem (%)	80,8	85,3	90,7	76,8	73,5

Na Tabela 6 observa-se grande redução do  $P_{80}$  do *overflow* do ciclone com a redução do diâmetro das bolas adicionadas ao moinho. Observa-se também para as mesmas simulações a diminuição da carga circulante e aumento da eficiência da moagem, devido ao aumento na cinética de quebra de determinadas faixas granulométricas da alimentação do moinho. O aumento do diâmetro das bolas produziu o efeito oposto, reduzindo a cinética de fragmentação, causando grande aumento da carga circulante e do  $P_{80}$ .

### 5.2.2 Alterações no grau de enchimento

A Tabela 7 apresenta, além do Caso Base, os efeitos obtidos nos índices selecionados a partir das simulações de três diferentes graus de enchimento de bolas do moinho. Assim, partindo-se de 27% do Caso Base, as simulações incluíram operação com 31%, 35%, 23% e 19% desta variável.

**Tabela 7: Efeitos da alteração do grau de enchimento do moinho**

Alterações no grau de enchimento do moinho					
Efeitos	Caso Base (27%)	31%	35%	23%	19%
P <sub>80</sub> (mm)	0,123	0,118	0,114	0,132	0,144
Carga Circulante (t/h)	278	270	267	282	296
Pressão Ciclone (kPa)	77	75	76	74	76
% Sólidos Ciclone	53,7	53	52,4	54,8	56,1
Eficiência Moagem (%)	80,8	77,1	74,4	85,1	90,4

Na Tabela 7 observa-se na significativa redução do P<sub>80</sub> do *overflow* do ciclone com o aumento do grau de enchimento, devido ao aumento da taxa de quebra como consequência do maior número de bolas dentro do moinho. A carga circulante também foi reduzida. A eficiência da moagem caiu devido ao aumento da potência utilizada pelo moinho, que afeta diretamente o WI operacional.

A redução do grau de enchimento surtiu efeito contrário, aumentando o P<sub>80</sub>, a carga circulante e a eficiência da moagem. É importante lembrar que a eficiência aqui considerada é baseada em modelos energéticos de moinhos e, portanto, é apenas mais um índice de desempenho do processo, que não deve ser analisada sem levar em conta os outros índices de desempenho.

### 5.2.3 Alterações na porcentagem de sólidos do moinho

A Tabela 8 apresenta, além do Caso Base, os efeitos obtidos nos índices selecionados a partir das simulações de duas diferentes porcentagens de sólidos da polpa de alimentação do moinho. Assim, partindo-se de 73,2% de sólidos do Caso Base, as simulações incluíram operação com 75,2% e 71,2% desta variável.

Tabela 8: Efeitos da alteração da porcentagem de sólidos do moinho

Alterações na porcentagem de sólidos no moinho			
Efeitos	Caso Base (73,2%)	75,2%	71,2%
$P_{80}$	0,123	0,120	0,127
Carga Circulante	278	272	281
Pressão Ciclone	77	75	76
% Sólidos	53,7	53,3	54,2
Eficiência Moagem	80,8	81,8	79,7

De acordo com a Tabela 8, a alteração na porcentagem de sólidos do moinho diminuiu o  $P_{80}$  e a carga circulante. Este resultado é atribuído ao maior tempo de residência das partículas no moinho. Analogamente, a carga circulante e o  $P_{80}$  aumentaram com a redução da porcentagem de sólidos, aqui atribuído ao menor tempo de residência.

### 5.3 Otimizações

Mediante a análise da alteração das dos parâmetros isoladamente foi possível determinar a magnitude da influência que cada uma das variáveis apresenta no circuito. A que causou maiores mudanças no  $P_{80}$  e na carga circulante foi o diâmetro máximo de bolas. O aumento do grau de enchimento e da porcentagem de sólidos no moinho também produziram efeitos positivos no desempenho. As alterações no *apex* e no *vortex* causaram efeitos considerados negativos, com exceção da simulação com *vortex* de 12,6", que apontou alterações consideradas muito pequenas.

A partir destes resultados foi possível identificar variáveis que deveriam ser modificadas para o aumento da vazão de alimentação do circuito, ou redução do  $P_{80}$ , de forma a criar cenários para as simulações. Essas variáveis são o diâmetro máximo de bolas, a porcentagem de sólidos no moinho e o grau de enchimento. Desta forma, as simulações 1, 2 e 3 têm por finalidade o aumento da vazão de alimentação do circuito. Já nas simulações 3, 4, e 5 o objetivo é a redução do  $P_{80}$ . A Tabela 9 mostra o Caso Base e as simulações, com os valores das variáveis alteradas.

Tabela 9: Descrição dos cenários simulados.

	Variáveis Alteradas			
	Diâmetro de bolas (")	% Sólidos no Moinho	Grau de Enchimento (%)	% Sólidos Ciclone
Caso Base	3	73,2	27	53,7
Cenário 1	2,5	75,2	27	54,8
Cenário 2	2,5	75,2	31	51,8
Cenário 3	2,5	75,2	35	55,3
Cenário 4	2,5	75,2	27	55,6
Cenário 5	2,5	75,2	31	51,1
Cenário 6	2,5	75,2	35	50,5

Todas as simulações mostradas na Tabela 9 tiveram o diâmetro máximo das bolas reduzido de 3" para 2,5". Apesar de nas simulações preliminares a redução do diâmetro das bolas para 2" apresentar maior redução de carga circulante e  $P_{80}$ , a alteração das variáveis deve ser feita de forma gradual devido a limitações dos próprios modelos, para que o modelo possa prever corretamente o comportamento do processo.

Outra variável comum nas simulações da Tabela 9 foi o aumento da porcentagem de sólidos no moinho de 73,2% para 75,2%. Esta variável deve ser alterada com cuidado, pois o aumento excessivo da porcentagem de sólidos impossibilita a moagem (CHAVES, 2006, p. 591).

O grau de enchimento foi mantido em 27% nas simulações 1 e 4, aumentado para 31% nas simulações 2 e 5, e aumentado para 35% nas simulações 3 e 6. A razão desta variável não ter sido modificada nas simulações 1 e 4 é que o motor do moinho existente na usina não teria potência suficiente para operar com graus de enchimento acima do utilizado no Caso Base. Portanto, para aumentar o grau de enchimento seria necessária a troca do motor e da transmissão do moinho.

A porcentagem de sólidos no ciclone foi alterada de forma a manter a pressão de operação do ciclone em torno de 75 kPa.

Os resultados das simulações descritas acima são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Resultados das simulações de otimização.

Efeitos	Cenários						
	Caso Base	Simulação 1	Simulação 2	Simulação 3	Simulação 4	Simulação 5	Simulação 6
Alimentação do circuito (t/h)	67,7	79,0	84,5	88,0	67,7	67,7	67,7
P <sub>80</sub> (mm)	0,123	0,123	0,124	0,123	0,110	0,106	0,102
Carga Circulante (t/h)	278	271	272	269	260	252	249
Pressão Ciclone (kPa)	77	75	76	75	75	74	75
% Sólidos Ciclone	53,7	54,8	55,3	55,6	51,8	51,1	50,5
Eficiência Moagem (%)	80,8	94,2	92,4	90,4	86,1	80,9	77,6

Observa-se na Tabela 10 que simulações 1, 2 e 3 mostram respectivamente aumento de 11,3, 16,8 e 20,3 t/h na vazão nova de alimentação do circuito, enquanto as simulações 4, 5 e 6 apresentam redução no P<sub>80</sub> de 13, 17 e 21 micrômetros, respectivamente. A eficiência energética da moagem aumentou substancialmente nas simulações 1 a 3, devido ao aumento da vazão de alimentação.

## 6 Conclusão

A partir da observação dos efeitos causados pela alteração do *apex* e do *vortex*, constatou-se não haver reduções significativas no  $P_{80}$  do *overflow* do ciclone, ou mesmo na carga circulante do circuito, este último indicador do potencial aumento capacidade do circuito. Conclui-se assim que, para o circuito estudado, tais variáveis apresentam efeito limitado, quer na geração de produto mais fino, ou mesmo no aumento de capacidade a partir do Caso Base adotado.

Já alterações nas variáveis de operação do moinho de bolas apresentaram relativa grande influência nos efeitos estudados. Neste caso, o maior efeito absoluto foi obtido mediante a diminuição do diâmetro das bolas, com até 18% de redução no  $P_{80}$  do *overflow* do ciclone, aliado a 10% de redução na carga circulante.

As simulações 1 e 4, nas quais o diâmetro de bolas foi reduzido de 3" para 2,5" e a porcentagem de sólidos no moinho foi aumentada de 73,2% para 75,2%, apresentaram ganhos relativamente grandes nas variáveis observadas, tendo sido possível aumentar a vazão de alimentação do circuito em 16,7% na simulação 1, e diminuir o  $P_{80}$  em 10,6% na simulação 4 em relação ao Caso Base. As variáveis alteradas nestas simulações não requerem investimentos significativos, sendo necessária apenas a redução da adição de água na alimentação do moinho e a reposição da carga do moinho com bolas menores.

As simulações 2, 3, 5 e 6, que além das alterações feitas nas simulações 1 e 4, tiveram o grau de enchimento aumentado para 31% (simulações 2 e 5) e 35% (simulações 3 e 6) apresentaram ganhos além dos observados nas simulações 1 e 4. No entanto, devido à capacidade do motor instalado na usina, estas mudanças necessitam de investimentos substanciais para poderem ser implementadas. Além da potência do motor, outros fatores que podem limitar o aumento do grau de enchimento são a resistência da estrutura do moinho, para suportar o acréscimo do peso dentro do moinho, e as aberturas de entrada e saída do moinho, para garantir que com o maior volume de bolas presente, as bolas em excesso não sejam descarregadas da carga do moinho. Caso seja possível aumentar o grau de enchimento, a vazão de alimentação do circuito pode ser aumentada em até 30% em relação ao caso base

aumentando-se o grau de enchimento para 35% de acordo com a simulação 3. O  $P_{80}$  pode ser diminuído em até 17%.



## REFERÊNCIAS

BARROS et al. **Circuitos de beneficiamento de minério fosfático operando em série**: uma alternativa à remoagem. In: XXVII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2017, Belém.

BERALDO, J. L. **Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 1987. 143 p.

BERGERMAN, M.G. **Modelagem e simulação do circuito de moagem do Sossego**. 207 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009

CHAVES, A. P., PERES, A. E. C. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios**: Britagem, Peneiramento e Moagem, 3ª Edição. São Paulo: Signus Editora, 2006.

DELBONI, H. **Classificação**. São Paulo, 2002a. Apostila.

DELBONI, H. **Modelagem de Operação de Moinhos de Bolas**. São Paulo, 2002b. Apostila

NAPIER-MUNN, T. J. et al. **Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimisation**. Indoorroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre/University of Queensland, 1996. 413 p.

SAMPAIO, J. A.; OLIVEIRA, G. P.; SILVA, A. O. Ensaio de classificação em hidrociclone. In: SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. (Ed).

**Tratamento de minérios: práticas laboratoriais.** Rio de Janeiro: CETEM, 2007. p. 139-154.

WILLS, B. **Wills' Mineral Processing Technology:** An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, 7<sup>th</sup> Edition. Queensland: Elsevier, 2008.