

**MARCOS DE PAIVA BUENO**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE CIRCUITOS DE MOINHOS  
COM BOLAS. ESTUDO DE CASO**

**São Paulo  
2006**

**MARCOS DE PAIVA BUENO**

**MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE CIRCUITOS DE MOINHOS  
COM BOLAS. ESTUDO DE CASO**

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  
2006**

EPMi

TF-2006

B862m

Sysno 1573411

M2006B

DEDALUS - Acervo - EP-EPMI



31700005961

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Bueno, Marcos de Paiva**

**Modelagem e simulação de circuitos de moinhos com bolas.  
Estudo de caso / M. de P. Bueno. -- São Paulo, 2006.  
60 p.**

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

**1.Cominuição 2.Modelagem matemática 3.Estudo de caso  
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento  
de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.**

**Eu Sou O Caminho A Verdade e A Vida.  
(Jesus Cristo)**

**A Deus com louvor e graças.**

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, talvez o mais importante deles, eu agradeço a Deus. Agradeço pela amizade, companhia, amor e paz que Ele me proporciona todos os dias fazendo a vida mais agradável e feliz. Ele é o meu pai eterno, a quem eu amo muito e agradeço por tudo o que sou.

Minha mãe Teresa, também é digna de meus agradecimentos. Isso porque se não fosse a constante luta dela contra tudo e todos em nome do meu futuro, tenho certeza que jamais estaria aqui. Por isso, obrigado mãe. Obrigado pelo seu esforço constante e pela sua dedicação. Eu te amo.

Ao meu grande professor e mestre Homero que me apoiou, me incentivou e me guiou durante toda a feitura deste trabalho, compartilhando seus conhecimentos e enriquecendo os meus.

Agradeço também a todos os professores e mestres que foram essenciais à minha formação pessoal e acadêmica.

À minha avó Nice, a minha irmã Karina e meu tio Aldemir, que sempre me apoiaram e se fizeram presentes na minha vida com carinho.

A todos os meus amigos que participam da minha vida fica também a minha imensa gratidão.

Ao Wilson, meu fiel companheiro, que está sempre junto comigo e feliz independentemente do meu humor.

E para finalizar, agradeço a Mirella por tudo o que ela representa na minha vida e por todo amor, carinho e compreensão que ela me oferece todos os dias.

Enfim agradeço a todas as pessoas que de alguma forma se fizeram especiais ao longo da minha vida.

## RESUMO

Os circuitos de cominuição são modelados e simulados por duas vertentes principais, sendo elas a do modelo energético e a do modelo de balanço populacional (PBM). A abordagem energética é a mais clássica dentre elas enquanto a segunda, embora mais recente, encontra-se consolidada como recurso confiável para projetos e otimização de circuitos industriais.

Este trabalho tem por base uma pesquisa na literatura das teorias em questão para que fosse possível elaborar uma análise crítica de ambas e também realizar exercícios de aplicação.

A aplicação dos diferentes conceitos foi feita de maneira prática e objetiva em dois casos reais. O primeiro, um dimensionamento de um futuro circuito industrial, com base em dados obtidos a partir de uma campanha em escala piloto. No segundo foi executada uma amostragem em circuito industrial, cuja modelagem serviu para a condução de exercícios de otimização de desempenho do mesmo.

Os exercícios realizados incluíram balanços de massas, ajuste dos modelos individuais de cada equipamento envolvido no processo e simulações. Os ajustes envolveram modelos de moinho de bolas, classificadores espirais e ciclones. Os modelos individuais também foram integrados de forma a obter plataformas robustas o suficiente para realizar simulações de processo. Tais exercícios mostraram que o modelo PBM foi adequado em explorar um maior número de variáveis de operação que a abordagem energética.

Palavras-chave: modelagem, simulação, moagem, Bond

## ABSTRACT

Comminution circuits may be modeled and simulated according to two main theories, which are the energy model and the population balance model (PBM). Although the energetic approach has been used for more than 50 years, both are fully consolidated and a reliable tool for projects and optimization of industrial circuits. And at this work both theories were carefully reviewed as basis for application exercises.

Both theories were applied in two practical cases. The first included a project situation where a pilot plant campaign data were used to design industrial equipments. The second was based on a survey carried out at an industrial circuit for later optimization exercises.

The exercises included mass balancing, model fitting and simulations. The later was particularly useful as the integrated circuit was robust enough to reproduce the experimental data as well as simulate a number of different scenarios of optimization. Such exercises showed that the PBM model was suitable for exploring a number of different operating variables, as opposed to the energetic approach.

Keywords: modelling, simulation, grinding, Bond



## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS  
LISTA DE FIGURAS  
LISTA DE SIMBOLOS

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>13</b>
3.1	MODELO DE BOND.....	13
3.2	MODELO DE BALANÇO POPULACIONAL .....	16
3.3	MODELO DO MISTURADOR PERFEITO ( <i>Perfect Mixing Model - PMM</i> ).....	17
3.4	CLASSIFICAÇÃO E MODELAGEM DE CICLONES.....	21
<b>4</b>	<b>ESTUDO DE CASO I – PLANTA PILOTO .....</b>	<b>24</b>
4.1	BALANÇO DE MASSAS .....	25
4.2	AJUSTE DOS MODELOS – “MODEL FIT” .....	26
4.2.1	Moinho de Bolas.....	26
4.2.2	Classificador .....	26
4.2.3	Global (Classificador + Moinho de Bolas) .....	27
4.3	SIMULAÇÕES .....	27
4.3.1	Moinho de Bolas.....	28
4.3.2	Ciclones .....	28
4.4	DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DE BOND.....	30
4.4.1	Resultado do Método de Bond no Simulador .....	30
<b>5</b>	<b>CASO II - OPTIMIZAÇÃO DE UM CIRCUITO DE MOAGEM .....</b>	<b>31</b>
5.1	BALANÇO DE MASSAS .....	31
5.2	AJUSTE DOS MODELOS – “MODEL FIT” .....	32
5.3	SIMULAÇÕES .....	33
5.3.1	Aumento na taxa de alimentação do circuito.....	33
5.3.2	Alimentação com minério mais resistente de maior WI .....	35
5.3.3	Produto mais fino.....	36
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>38</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>39</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Informações sobre os fluxos	25
Tabela 4.2 – Taxa de quebra $r/d^*$ determinadas na calibração do moinho de bolas	26
Tabela 4.3 – Valores do modelo da curva de eficiência de partição obtidos no ajuste	26
Tabela 5.1 – Informações sobre o moinho da linha A	31
Tabela 5.2 – Informações sobre as vazões dos fluxos da linha A	31
Tabela 5.3 – Informações dos fluxos após simulação	37

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Fragmentação descrita pelo Modelo do Misturador Perfeito (extraída de Napier-Munn, 1996)	18
Figura 3.2 – Variação da função $r/d^*$ com o tamanho de partícula (extraída de Napier-Munn, 1996)	19
Figura 4.1 – Layout da Planta Piloto	24
Figura 4.2 – Distribuição granulométrica amostrada dos fluxos	24
Figura 4.3 – Distribuições granulométricas experimentais e calculadas no Balanço de Massas	25
Figura 4.4 – Distribuições granulométricas experimentais e calculadas no ajuste do modelo ( <i>Model Fit</i> )	27
Figura 4.5 – Distribuições granulométricas experimentais e calculadas na simulação do moinho	28
Figura 4.6 – Distribuições granulométricas experimentais e calculadas na simulação do ciclone	29
Figura 4.7 – Distribuições granulométricas experimentais e calculadas na simulação do ciclone + moinho	29
Figura 4.8 – Distribuição granulométrica experimentais e simuladas para o moinho de 18' x 30'	30
Figura 5.1 – Distribuições granulométricas experimentais e calculadas no balanço de massas da Linha A	32
Figura 5.2 – Distribuições granulométricas experimentais e calculadas no <i>Model Fit</i> da Linha A	32
Figura 5.3 – Layout da Linha A com seus valores ajustados para a simulação	33
Figura 5.4 – Distribuições granulométricas resultante do aumento da taxa de alimentação	34
Figura 5.5 – Distribuições granulométricas resultante da redução do tamanho das bolas	34
Figura 5.6 – Distribuições granulométricas resultante da mudança no WI do minério	35
Figura 5.7 – Distribuições granulométrica simuladas após ajuste das variáveis	36
Figura 5.8 – Distribuições granulométricas simuladas em comparação com as ajustadas	37

## LISTA DE SIMBOLOS

$a_{ij}$	Função distribuição de quebra, correspondente à fração da $j$ -ésima faixa granulométrica, que aparece na $i$ -ésima faixa granulométrica devido à quebra;
$b_{ij}$	Função de quebra;
$C_v$	Porcentagem de sólido em volume na alimentação;
$C_w$	Porcentagem de sólido em massa na alimentação;
$D$	Diâmetro interno do moinho (m);
$D_c$	Diâmetro do ciclone (m);
$D_i$	Diâmetro do <i>vortex finder</i> (m);
$D_u$	Diâmetro do <i>apex</i> (m);
$d$	Tamanho de partícula;
$d_i$	Função taxa de descarga correspondente à $i$ -ésima faixa granulométrica ( $h^{-1}$ );
$d_{50}$	Tamanho mediano de partição real ( $\mu m$ );
$d_{50c}$	Tamanho mediano de partição corrigida ( $\mu m$ );
$d_{80}$	Malha pela qual passam 80% do material em peso;
$EF_i$	Fatores de correção de Rowland;
$F$	$d_{80}$ do fluxo de alimentação;
$F_o$	Tamanho ótimo de alimentação do moinho de barras e bolas ( $\mu m$ );
$f_i$	Vazão de sólidos da alimentação do moinho, correspondente à $i$ -ésima faixa granulométrica (t/h);
$g$	Aceleração da gravidade ( $m/s^2$ );
$h$	Fator de distribuição de tamanho das partículas (adimensional);
$L_c$	Comprimento da seção cilíndrica do ciclone;
$K_D$	Constante da equação relativa ao diâmetro mediano de separação;
$K_Q$	Constante da equação relativa a vazão;
$K_v$	Constante da equação relativa a recuperação de polpa;

$K_w$	Constante da equação relativa a recuperação de água;
OF	<i>Overflow</i> ;
P	$d_{80}$ do fluxo de produto;
P	Pressão de alimentação do ciclone;
$p_i$	Vazão de sólidos do produto do moinho, correspondente à i-ésima faixa granulométrica (t/h);
$Q_f$	Vazão volumétrica de polpa na alimentação ( $m^3/h$ );
$R_f$	Recuperação de água no <i>underflow</i> (%);
$R_v$	Recuperação volumétrica de polpa no <i>underflow</i> (%);
$r_i$	Função taxa de quebra, correspondente à i-ésima faixa granulométrica ( $h^{-1}$ );
$s_i$	Massa da carga do moinho correspondente à i-ésima faixa granulométrica (t);
UF	<i>Underflow</i> ;
W	Consumo energético específico de moagem (kWh/t);
WI	<i>Work Index</i> do material (kWh/t);
$WI_o$	<i>Work Index</i> operacional (kWh/t);
$WI_{oc}$	<i>Work Index</i> operacional corrigido (kWh/t);
$\alpha$	Coefficiente de inclinação da curva padrão de partição;
$\rho$	Massa específica do material ( $g/cm^3$ );
$\lambda$	Termo de correção para sedimentação retardada;
$\theta$	Ângulo da seção cônica ( $^\circ$ );

# 1 INTRODUÇÃO

A civilização industrial moderna não pode existir sem uma vasta gama de tecnologias de cominuição. Estima-se que a energia elétrica consumida em processos de trituração de materiais corresponde a, aproximadamente, 3% do consumo total de energia utilizada no mundo (Tavares, 2001). A cominuição desses materiais – sejam eles minérios, produtos ou insumos para a indústria química, cerâmica, alimentícia ou farmacêutica – é normalmente realizada em britadores e moinhos, que apresentam eficiência energética notavelmente baixa. Essas constatações foram algumas das principais motivações para a pesquisa em cominuição ao longo do século 20, que resultou no desenvolvimento de algumas tecnologias inovadoras.

Para enfatizar a importância da cominuição na sociedade atual, um relatório da U.S. National Materials Advisory Board em 1981 com objetivos de melhorar o consumo de energia no processo de cominuição, estimou que 1,5% de toda energia elétrica nos EUA foi consumida neste tipo de processo (incluindo energia requerida para produzir os equipamentos de aço usados na cominuição). O relatório constatou que melhorias reais na eficiência energética da cominuição incluindo aspectos de classificação e controle de processo, poderiam resultar numa economia anual de energia nos EUA maior do que 20 bi kWh por ano. (Napier-Munn, 1996)

Processos de cominuição representam uma grande fatia do capital e custo operacional de qualquer planta de processamento mineral. Cohen (1983) estimou que de 30% a 50% do consumo energético da planta, podendo chegar até 70% para minérios duros é consumido pela cominuição.

Desta forma, nota-se que a cominuição é uma importante etapa do processo, que está diretamente relacionada com o custo inicial de implantação da planta. Além disso, nesta etapa do processo é consumida uma grande quantidade de energia elétrica. Esta que por sua vez além de representar grande custo operacional gera também grande impacto ambiental para ser gerada.

O presente trabalho tem como foco a etapa de moagem executada especificamente por moinho com bolas, estes que são grandes equipamentos. Sendo assim, o seu bom dimensionamento e sua otimização estão diretamente relacionados com a redução destes custos (implantação e operação). Para o dimensionamento destes existem duas vertentes uma energética e outra de modelos de balanço populacional.

Sendo assim, este trabalho tem como objetivo comparar os resultados de simulações feitas a partir de calibração de modelos das diferentes vertentes, através de dados obtidos de diferentes circuitos industriais. Para isso foram coletados dados de diferentes operações industriais e a partir destes calibrou-se os modelos, que serviram de base para simular e assim verificar as diferenças obtidas, segundo cada modelo.

## 2 OBJETIVOS

O principal intuito deste trabalho foi traçar um paralelo entre a aplicação de conceitos de modelagem matemática e energética a dados provenientes de uma planta piloto, bem como a equipamentos de um circuito industrial de moagem e classificação de moagem de minério de ouro. Sendo o objetivo final realizar simulações para explorar as características intrínsecas de cada modelo bem como seus mecanismos de funcionamento.

Tendo em vista que as teorias aqui estudadas não constituem uma novidade na área de tratamento de minérios, o foco do trabalho foi analisar estas teorias aplicando-as de forma prática e objetiva em dois casos específicos. Sendo o primeiro caracterizado por dimensionar um circuito industrial a partir de uma planta de escala piloto e o segundo caso onde se buscou analisar a funcionalidade dos modelos como ferramenta de otimização de um circuito industrial em operação.

A modelagem matemática utilizada para atingir o objetivo mencionado foi a da chamada Escola Australiana, presente na plataforma JKSimMet versão 5.2 que desenvolveu-se no *Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre*, da Universidade de Queensland.

Vale lembrar que durante a realização do trabalho foi feita uma análise crítica de qualidade dos dados experimentais utilizados, bem como garantir a eficácia do uso da ferramenta computacional, estudando e compreendendo a teoria de modelagem que é a base da mesma.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo foi organizada uma revisão bibliográfica de acordo com a sequência das etapas realizadas durante o desenvolvimento do trabalho, onde foram aplicados os conceitos de modelagem e simulação às operações de beneficiamento mineral.

Sendo assim, foram abordadas duas vertentes de modelamento, a energética e de balanço populacional. Foi dada ênfase no modelo de Bond e nos modelos matemáticos de moinho de bolas e ciclones, bem como nas técnicas para ajusta-los e realizar as simulações.

#### 3.1 MODELO DE BOND

O modelo Fred C. Bond, é de aproximação energética. Tais modelos tentavam estabelecer “Leis” para associar a redução de tamanho de fragmentos de rocha à energia aplicada nos processos de britagem e moagem.

O método de Bond seguiu-se as teorias de Kick e Rittinger. Este método foi desenvolvido nos laboratórios da Allis Chalmers, de forma empírica e prática, amostrando e controlando operações de moinhos industriais eficientes, sendo que as amostras eram processadas numa usina piloto montada na própria Allis.

De acordo com a Lei de Bond, a tensão absorvida por um cubo sob compressão varia com seu volume, ou  $x^3$ . Porém, após a formação da cunha, a energia efetivamente flui para a superfície, variando assim com  $x^2$ . Para superfícies irregulares, a energia absorvida estaria entre esses dois valores, isto é  $x^3$  e  $x^2$ , sendo então proporcional a  $x^{3/2}$ . Como o número de partículas em um certo volume varia em função de  $x^{-3}$ , então a energia necessária à fragmentação por unidade de volume é dada pela relação abaixo.

$$\frac{x^{\frac{3}{2}}}{x^3} = \frac{1}{\sqrt{x}} \quad (1.1)$$

Embora totalmente experimental e descompromissado com qualquer fundamento teórico, Bond tentou transformar seu método em uma “terceira teoria” (Chaves, 1999). Segundo Bond, a energia gasta é proporcional ao comprimento da crista de trinca gerada no esforço mecânico aplicado e igual ao trabalho representado pelo produto menos o representado pela alimentação. Ele expressou essa relação da seguinte forma:

$$W = 10 WI \left( \frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (1.2)$$

$$\text{E também } P = T * W \quad (1.3)$$

Onde

- W = Energia de alimentação ao equipamento (kWh/st)
- WI = *work index* – constante específica do material (kWh/st)
- $P_{80}$  = malha que 80% do produto é passante ( $\mu\text{m}$ )
- $F_{80}$  = malha que 80% da alimentação é passante ( $\mu\text{m}$ )
- T = vazão de alimentação nova (t/h)
- P = Potência do moinho (kW)

O *work index* é o parâmetro de cominuição que expressa a resistência do material à quebra e à moagem, podendo ser traduzido como “índice de moabilidade”. Numericamente, expressa quantos kWh são necessários para reduzir o material do tamanho infinito teórico de alimentação até 80% passante em 100 micrômetros.

Como as condições em que Bond trabalhou foram restritas a moinhos de 2,44 m (8 ft) de diâmetro, para moinhos de barras a úmido em circuito aberto ou moinhos de bolas a úmido em circuito fechado, à medida que as condições operacionais se afastarem delas, torna-se necessário introduzir fatores de correção. A maioria deles foi desenvolvida por Rowland e estão na lista a seguir, extraída da apostila de aula do Prof. Homero Delboni.

**EF1:** Se a moagem for feita a seco, multiplicar o valor de W por 1,3 (a moagem a seco consome 30% de energia a mais que a moagem a úmido).

**EF2:** Se a moagem for feita em moinho de bolas em circuito aberto, multiplicar o valor de W pelo fator encontrado na seguinte tabela:

% do produto menor que o nominal	EF2
50	1,035
60	1,05
70	1,10
80	1,20
90	1,40
92	1,46
95	1,57
98	1,70

**EF3:** Se o diâmetro interno do moinho for diferente de 8 ft, multiplicar W por:

$$\begin{aligned} EF3 &= (8/D)^{0,2} && \text{para D em ft} \\ EF3 &= (2,44/D)^{0,2} && \text{para D em m} \end{aligned}$$

Se  $D > 3,83 \text{ m}$  ( $12 \frac{1}{2}'$ ) então  $EF3 = 0,914$  (constante)

**EF4:** Considera a energia adicional necessária quando a alimentação é muito grossa. O tamanho ótimo da alimentação é fornecido por:

$$\text{Moinho de barras: } F_o = 1600 \sqrt{\frac{13}{WI}} \mu\text{m}$$

$$\text{Moinho de Bolas: } F_o = 4000 \sqrt{\frac{13}{WI}} \mu\text{m}$$

**SE  $F < F_o$ , EF4 NÃO SE APLICA**

$$\text{Caso contrário, multiplica-se W por: } EF4 = \frac{R_r + (WI - 7) \times \left( \frac{F - F_o}{F_o} \right)}{R_r}$$

Onde  $R_r$  = relação de redução ( $F/P$ )



**EF5:** Considera a energia adicional para moagens extremamente finas ( $d_{80}$  = menores que 200# ou 0,074 mm).

$$EF5 = \frac{P + 10,3}{1,145 \times P}$$

**EF6:** A relação de redução ótima que o moinho de barras pode fornecer é dada por:

$$R_{ro} = 8 + \left( 5 \times \frac{L}{D} \right)$$

Onde, L = comprimento das barras, ft  
D = Diâmetro interno do moinho, ft

Quando a relação se afastar muito da ótima, será necessário fornecer potência adicional:

$$EF6 = 1 + \frac{(R_r - R_{ro})^2}{150} \quad \begin{array}{l} \text{Se } R_r - 2 < R_r < R_{ro} + 2, \text{ EF6 não se aplica} \\ \text{Se } WI < 7,0 \text{ e } R_r \geq R_{ro} + 2 \text{ ou } R_r \leq R_{ro} - 2, \text{ EF6 = 1,2} \end{array}$$

**EF7:** Se a relação de redução de um moinho de bolas é inferior a 6, multiplicar W por:

$$EF7 = \frac{(R_r - 1,35) + 0,26}{2(R_r - 1,35)} = \frac{R_r - 1,22}{R_r - 1,35}$$

**EF8:** Considera o fator de ineficiência dos moinhos de barras e serve para compensar a diferença entre potências calculadas pela fórmula e potências consumidas na realidade:

➤ Moinho de barras sozinho no circuito de moagem:

EF8 = 1,4 se a alimentação vem de um circuito aberto de britagem

EF8 = 1,2 se a alimentação vem de um circuito fechado de britagem

➤ Moinho de barras operando em conjunto com moinho de bolas:

EF8 = 1,2 se a alimentação vem de um circuito aberto de britagem

EF8 = 1,0 se a alimentação vem de um circuito fechado de britagem

Rowland também determinou que para moinhos com comprimentos diferentes dos tabelados, a potência consumida varia na proporção direta do comprimento, como pode-se observar na fórmula (1.4), lembrando sempre que  $Pot_{corrigida} = W \times EF_i$ , ou seja é potência obtida após a aplicação dos fatores de correção citados acima.

$$L_{corrigido} = \frac{Pot_{corrigida}}{Pot_{tabelada}} * L_{tabelado} \quad (1.4)$$

### 3.2 MODELO DE BALANÇO POPULACIONAL

O *Population Balance Model* - PBM foi introduzido por Epstein (1947) e posteriormente desenvolvido por Austin e Whiten nas décadas de 1970 e 1980. O modelo também foi aplicado na Austrália (Kelsall *et al* 1969), na América do Norte (Herbst and Fuerstenau 1968, 1980, Herbst *et al* 1985) e Europa (Guillaneau *et al* 1995). O texto que se segue tem por base a apostila do curso de pós-graduação do prof. Homero Delboni Jr.

Este modelo também é conhecido como “modelo de taxa de primeira ordem” porque assume-se que a produção de material moído no interior do moinho por intervalo de tempo depende unicamente da massa da fração granulométrica considerada, que estiver presente na carga do moinho. Sendo assim, existe uma constante para cada faixa granulométrica que caracteriza a taxa de desaparecimento. Sendo assim a taxa de quebra, ou *breakage rate*, é expressa da forma abaixo:

*Massa moída* =  $k_i s_i$  onde,

$k_i$  = taxa de quebra da  $i$ -ésima fração granulométrica da carga do moinho (min<sup>-1</sup>)

$s_i$  = massa da  $i$ -ésima fração granulométrica da carga do moinho (kg)

O parâmetro  $k_i$  pode ser determinado a partir de ensaios de laboratório ou retro-calculado, conforme descrito a seguir.

Enquanto a hipótese de quebra de primeira ordem simplifica o modelo, faz com que ele não possa ser aplicado às faixas de operação muito grandes. Assim, o que se mantém aproximadamente constante é número de choques em cada intervalo de energia e portanto se a quantidade de partículas for muito superior ou inferior ao número de impactos, a premissa de primeira ordem não será válida.

A dedução da equação básica do PBM tem por referência o balanço de massas para uma faixa granulométrica individual, ou seja:

Alimentação + Material fragmentado de faixas superiores	=	Produto + Material fragmentado que sai da faixa considerada.
---	---	--

Além da taxa de quebra ( $k_i$ ), outro parâmetro importante para o desenvolvimento do PBM é a função de quebra ( $b_{ij}$ ), que indica a fração de uma faixa granulométrica superior que, após a quebra, passa à faixa granulométrica considerada. Desta maneira o balanço fica definido por:

$$f_i + \sum b_{ij} k_j s_j = p_i + k_i s_i \quad (2.1)$$

$f_i$  = vazão de sólidos da alimentação do moinho, correspondente a  $i$ -ésima faixa granulométrica (t/h);

$p_i$  = vazão de sólidos do produto do moinho, correspondente a  $i$ -ésima faixa granulométrica (t/h);

$b_{ij}$  = função distribuição de quebra, correspondente a fração da  $j$ -ésima faixa granulométrica, que aparece na  $i$ -ésima faixa granulométrica devido a fragmentação;

$k_i$  = função taxa de quebra, correspondente a  $i$ -ésima faixa granulométrica (h<sup>-1</sup>);

$s_i$  = massa da carga do moinho correspondente a  $i$ -ésima faixa granulométrica (t).

Para estimar a distribuição do produto de um moinho a equação acima pode ser reescrita de seguinte maneira:

$$p_i = f_i - k_i s_i + \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} k_j s_j \quad (2.2)$$

Através de amostragens os parâmetros  $p_i$ ,  $f_i$ , e  $s_i$ , podem ser determinados e juntamente com uma função (ou matriz), que seja representativa para o parâmetro  $b_{ij}$ , é possível calcular diretamente um conjunto de valores  $k_i$ , começando a partir da faixa granulométrica superior.

Uma derivação do PBM, de desenvolvido independente, porém concomitante a Austin, foi desenvolvida na Austrália por William Whiten. O modelo foi chamado de *Perfect Mixing Model* –PMM ou Modelo de Misturador Perfeito e este é o principal modelo utilizado atualmente em modelagem de circuitos industriais de moagem, sendo tratado em detalhes no próximo item.

### 3.3 MODELO DO MISTURADOR PERFEITO (*Perfect Mixing Model* - PMM)

Este modelo é similar ao modelo de balanço populacional, que se baseia em conceitos de taxa de quebra, distribuição de tamanhos característicos após o evento de quebra e o movimento diferencial das partículas dentro do equipamento.

A maior complexidade nos modelos de balanço populacional vem da consideração sobre a mistura. Portanto assumir um moinho perfeitamente misturado elimina as complexidades de estabelecer o tempo de residência para cada faixa granulométrica no interior do moinho.

O modelo de Whiten é empregado para modelagem de qualquer equipamento de fragmentação e apresenta as mesmas vantagens e limitações das simplificações introduzidas inerentes ao PBM. Entretanto, em ambientes industriais esse modelo é largamente aplicado, desde que as mudanças nas condições operacionais estejam contidas em faixas relativamente estreitas. A literatura especializada é farta em registros de melhorias de desempenho de circuitos industriais de moagem, resultantes da aplicação do PMM.

Este modelo baseia-se também no mesmo balanço de massas para uma fixa granulométrica individual do PBM e para isso a soma abaixo precisa ser igual a zero:

Alimentação – Material fragmentado que sai da faixa considerada + Material fragmentado de faixas superiores – Produto
---

Entretanto, a terminologia do Whiten usa  $r_i$  para designar a taxa de quebra e utiliza o fator  $a_{ij}$  para uma função de aparecimento (*appearance function*), que representa a fração retida na malha  $i$  proveniente da malha  $j$ , após um evento de fragmentação.

Como o conteúdo do moinho é considerado perfeitamente misturado, a carga do moinho está relacionada com o produto através de uma taxa de descarga,  $d_i$ , para cada faixa granulométrica. Assim tem-se:

$$p_i = d_i s_i \quad \text{ou} \quad s_i = p_i / d_i \quad (3.1)$$

O balanço de massas para cada faixa granulométrica é então descrito da seguinte maneira pelas equações básicas do PMM:

$$f_i + \sum_{j=1}^i a_{ij} r_j s_j = p_i + r_i s_i \quad \text{ou} \quad f_i - p_i + \sum_{j=1}^i a_{ij} r_j s_j - r_i s_i = 0 \quad (3.2)$$

Os vetores  $f_i$ ,  $p_i$  e  $s_i$  representam, respectivamente, a taxa de alimentação do moinho, a taxa de descarga do moinho e o conteúdo interno do moinho (carga) em cada intervalo granulométrico. A variável  $a_{ij}$  representa a *appearance function*, já descrita anteriormente.

O diagrama abaixo apresenta os fluxos mássicos correspondentes às partículas encaminhadas a uma determinada fração granulométrica e dela descarregadas.

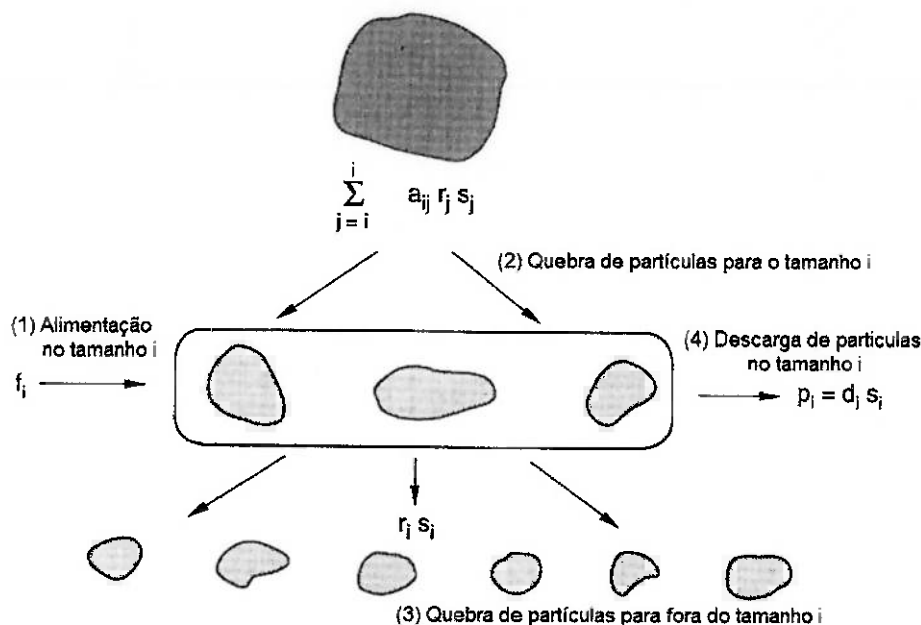


Figura 3.1 – Fragmentação descrita pelo Modelo do Misturador Perfeito (extraída de Napier-Munn, 1996)

- (1)  $f_i$  = vazão de alimentação da fração  $i$  do moinho;
- (2)  $\sum_{j=1}^i a_{ij} r_j s_j$  = vazão para a  $i$ -ésima faixa granulométrica do moinho,  
proveniente de quebras que ocorrem em faixas granulométricas mais grossas que  $i$
- (3)  $r_i s_i$  = vazão na qual o material deixa a fração  $i$  e passa para frações mais finas da carga do moinho
- (4)  $p_i = d_i s_i$  = vazão na qual o material deixa a fração  $i$  e deixa o moinho

Sob o ponto de vista da modelagem matemática, é uma limitação prática quantificar diretamente a distribuição granulométrica do minério contido no interior do moinho. Em razão disto, as duas equações básicas do PMM, acima apresentadas, foram modificadas para possibilitar a aplicação no caso específico de modelagem de moinhos de bolas, permitindo a normalização dos parâmetros taxa de quebra e descarga.

Combinando as equações (3.2) e (3.1) obtêm-se:

$$f_i - p_i \left( 1 + \frac{r_i}{d_i} \right) + \sum_{j=1}^i a_{ij} p_j \left( \frac{r_j}{d_j} \right) = 0 \quad (3.3)$$

Desta forma defini-se a relação  $r/d$  como o principal parâmetro do modelo de operação de moinho de bolas. Este parâmetro pode ser calculado diretamente a partir de dados referentes às distribuições granulométricas da alimentação e do produto do moinho, bem como uma função de quebra (*appearance function*) que seja representativa para o minério processado.

Para que haja uma simples correção devido a variações no tempo de residência, o parâmetro  $d_i$  é normalizado, dividindo-o pelo tempo de residência médio das partículas no interior do moinho. Assim, o parâmetro  $r/d^*$  obtido independe das dimensões ou mesmo condições operacionais do moinho estudado. A equação abaixo representa a normalização do parâmetro  $r/d$ .

$$d_i^* = \left( \frac{D^2 L}{4Q} \right) d_i \quad \text{ou} \quad \frac{r_i}{d_i} = \frac{r_i}{d_i^*} \times \left( \frac{D^2 L}{4Q} \right) \quad (3.4)$$

Onde  $D$  = diâmetro interno do moinho (m)  
 $L$  = comprimento interno do moinho (m)  
 $Q$  = vazão volumétrica de alimentação do moinho (m<sup>3</sup>/h)

O modelo matemático da operação de moinhos de bolas fica definido a partir das características do minério (*appearance function*) e do equipamento ( $r/d^*$ ). Sendo que o parâmetro ( $r/d^*$ ) é representado por uma curva quadrática, definida por 3 ou 4 pontos, utilizando-se o método *spline function* (pontos conectados por linhas suaves) para cobrir toda a faixa granulométrica estudada. Como é mostrado na figura abaixo.

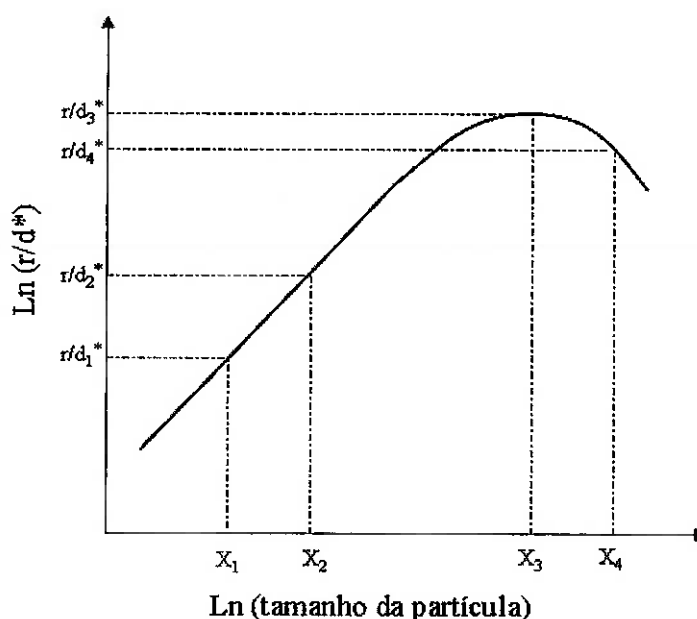


Figura 3.2 – Variação da função  $r/d^*$  com o tamanho de partícula (extraída de Napier-Munn, 1996)

Mas na prática, o que se observa é que o parâmetro  $r/d^*$  não é função somente do equipamento, mas sim de uma complexa interação entre o equipamento e o minério processado. Em razão disso, para otimização de operações existentes é recomendado realizar amostragens para calibrar o modelo. No caso de projetos de novas instalações são utilizados valores de operações similares contidas em bancos de dados ou, numa fase mais avançada do projeto, dados de plantas piloto obtidos com o minério a ser processado.

Este modelo provou ser eficiente o suficiente para permitir o cálculo do desempenho de moinhos de bolas para uma vasta gama de condições de operação, muitas vezes até para condições significativamente diferentes para as quais foi calibrado.

O modelo estará calibrado e pronto para iniciar as simulações, após serem calculados, ou selecionados, os valores do parâmetro  $r/d^*$ , em conjunto com as características do minério ( $a_{ij}$ ). Os valores normalizados do parâmetro  $r/d^*$  servirão de base para o cálculo de  $r/d$ , de acordo com as condições específicas simuladas. Sendo assim, a equação abaixo serve de base para exercícios de simulação utilizando moinho de bolas.

$$\left(\frac{r_i}{d_i^*}\right)_{SIM} = (\text{FATOR DE ESCALA}) \times \left(\frac{r_i}{d_i^*}\right)_{AJUS} \quad (3.5)$$

A equação acima indica, portanto que a função taxa de quebra normalizada ( $r/d^*$ ) pode ser escalonada em função dos valores empregados em simulações, ou seja, os valores obtidos a partir de ajuste de modelos ( $r/d^*$  ajus) serão calculados para as simulações ( $r/d^*$  sim) com base na equação acima.

Os cinco fatores de escala são relativos às variáveis de operação passíveis de alteração e seus efeitos no parâmetro  $r/d^*$ , estando abaixo resumidamente descritos.

➤ **Efeito do Diâmetro (D) do Moinho**

$$F_A = \sqrt{\left(\frac{D_{SIM}}{D_{AJUS}}\right)}$$

➤ **Efeito do Grau de Enchimento (GE) do Moinho**

$$F_B = \left[ \frac{(1 - GE_{sim})GE_{sim}}{(1 - GE_{ajus})GE_{ajus}} \right]$$

➤ **Efeito da Velocidade (Vel. em % da Velocidade Crítica) do Moinho**

$$F_C = \left(\frac{Vel_{sim}}{Vel_{ajus}}\right)$$

O Fator de correção acima é válido para variações da velocidade do moinho ( $V_m$ ) dentro dos seguintes limites,  $55\% C_s < V_m < 78\% C_s$ , onde  $C_s$  corresponde ao valor da velocidade crítica do moinho.

➤ **Efeito da Variação das Características de Moabilidade (WI) do Minério**

$$F_D = \left( \frac{WI_{ajus}}{WI_{sim}} \right)^{0,8}$$

O efeito da variação do tamanho de bolas no desempenho do moinho foi também objeto de investigações, sendo quantificado da seguinte forma:

➤ **Efeito do Diâmetro ( $D_b$ ) de Bolas**

$$X_{max} = K D_b^2 \quad \text{Onde,}$$

$X_{max}$  = tamanho de partícula no qual ocorre a máxima taxa de quebra (mm)

$D_b$  = diâmetro de bola (mm)

$K$  = constante (aproximadamente  $4,4 \times 10^{-4} \text{ mm}^{-1}$ )

$$\begin{array}{ll} r/d^* & \propto D_b^2 \quad \text{para } x > x_{max} \\ r/d^* & \propto 1/D_b \quad \text{para } x < x_{max} \end{array}$$

Assim sendo, os fatores de correção são os seguintes:

$$F_E = \left( \frac{D_{b\,sim}}{D_{b\,ajus}} \right)^2 \quad \text{para } x > x_{max} \quad \text{ou} \quad F_E = \left( \frac{D_{b\,ajus}}{D_{b\,sim}} \right) \quad \text{para } x < x_{max}$$

### 3.4 CLASSIFICAÇÃO E MODELAGEM DE CICLONES

As duas vertentes de modelagem têm um posicionamento diferente quanto à classificação de fechamento do circuito de moagem. O modelo do Bond assume um classificador padrão com uma carga circulante pré-determinada. Já os modelos matemáticos de operação de moinhos de bolas são combinados a um modelo de simulação da operação do equipamento de classificação.

Os modelos matemáticos da operação de equipamentos de classificação são baseados em dois componentes. O primeiro é o modelo da curva de partição do sistema minério/equipamento e o segundo é o modelo de operação do equipamento, que fornece, principalmente, valores de capacidade.

A curva de partição indica a proporção da alimentação que é encaminhada ao *underflow*, pois se trata de equipamentos de sedimentação e este fluxo contém a maioria de grossos. Esta definição pode ser tomada em caráter global, ou seja, o quociente da divisão entre as vazões totais de *underflow* e alimentação ou, em caráter individual para cada faixa discreta de tamanhos,  $Pe = \frac{u_i}{a_i}$ .

A curva obtida desta forma é a curva real do sistema e ela geralmente não passa pela origem, devido à presença de finos no *underflow*, fenômeno que é chamado de by-pass foi quantificado por Kelsall como sendo igual à recuperação de água no *underflow*,  $P_c = \frac{P_e - R_f}{1 - R_f}$ .

Quando a parcela correspondente ao by-pass é subtraída de cada classe granulométrica, obtém-se a curva de partição corrigida do sistema. Conforme foi proposto por Yoshioka e Hota, ao dividir-se os valores das abscissas desta (tamanho das partículas) pelo diâmetro mediano de partição ( $d_{50c}$ ), chega-se à curva de padrão do sistema, que segundo Lynch & Rao, é de importância fundamental para a modelagem matemática, pois independe da condição operacional do sistema e mostra-se válida para ciclones de diferentes tamanhos.

Existem três parâmetros necessários para se caracterizar a operação através de curvas de partição, que são:

- Inclinação ( $\alpha$ ) da curva no segmento próximo ao  $d_{50c}$ . Por ser um parâmetro de dispersão,  $\alpha$  está associado à eficiência da separação;
- Diâmetro mediano da separação ( $d_{50c}$ ) indica o tamanho de partícula que tem a mesma probabilidade de ser encaminhado para o *underflow* ou para o *overflow*. É um parâmetro de posição da curva;
- Partição de água do *underflow* ( $R_f$ ), associado à parcela correspondente ao *by-pass*.

As equações mais utilizadas para representar a curva padrão de partição são a de Rosin-Rammler e a de Whiten, apresentadas respectivamente a seguir:

$$P_c = 1 - e^{-\ln 2 \left( \frac{d_i}{d_{50c}} \right)^\alpha} \quad \text{ROSIN-RAMMLER} \quad (4.1) \quad P_p = \frac{e^\alpha - 1}{e^{\alpha x_i} + e^\alpha - 2} \quad \text{WHITEN} \quad (4.2)$$

Existem na literatura diferentes modelos de operação de ciclones, porém os modelos mais consagrados são os de Plitt e Nageswararao, com diferenças importantes, que não foram abordadas neste trabalho. A seguir será descrito o modelo de Nageswararao, em termos das equações paramétricas, suas peculiaridades e limitações.

O modelo de Nageswararao tem por base quatro equações relativas ao cálculo do diâmetro mediano de separação, partição de água, partição de polpa e vazão volumétrica de alimentação do ciclone.

A primeira é a equação relativa ao diâmetro mediano de separação, fórmula (4.1). A partir de dados de operações piloto ou industriais obtém-se a constante  $K_{D0}$ , que permite a calibração da equação e depende das características do minério que alimenta o ciclone, principalmente quanto à distribuição granulométrica e peso específico.

$$d_{50c} = K_{D0} \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{-0,5} (\theta)^{0,15} \left( \frac{L_c}{D_c} \right)^{0,2} D_c^{0,35} \left( \frac{D_o}{D_c} \right)^{0,52} \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^{-0,47} \lambda^{0,93} \left( \frac{P}{\rho_p g D_c} \right)^{-0,22} \quad (4.3)$$

A equação relativa à vazão volumétrica (pressão) de alimentação do ciclone, com a qual é possível determinar outro fator de ajuste, o  $K_{Q0}$ , é a seguinte:

$$Q_f = K_{Q0} D_c^{1,9} \left( \frac{P}{\rho_p} \right)^{0,5} \left( \frac{D_o}{D_c} \right)^{0,68} \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{0,45} \theta^{-0,1} \left( \frac{L_c}{D_c} \right)^{0,2} \quad (4.4)$$



As partições de água ( $R_f$ ) e polpa ( $R_v$ ) para o *underflow* são calculadas pelas equações abaixo:

$$R_f = K_{w1} \left( \frac{D_o}{D_c} \right)^{-1,19} \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^{2,4} \left( \frac{P}{\rho_p g D_c} \right)^{-0,53} \lambda^{0,27} \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{-0,50} \theta^{-0,24} \left( \frac{L_c}{D_c} \right)^{0,22} \quad (4.5)$$

$$R_v = K_{v1} \left( \frac{D_o}{D_c} \right)^{-0,94} \left( \frac{D_u}{D_c} \right)^{1,83} \left( \frac{P}{\rho_p g D_c} \right)^{-0,31} \left( \frac{D_i}{D_c} \right)^{-0,25} \theta^{-0,24} \left( \frac{L_c}{D_c} \right)^{0,22} \quad (4.6)$$

Quando as quatro constantes de proporcionalidade, que dependem exclusivamente das características do minério alimentado e compõem as equações (4.3), (4.4), (4.5) e (4.6) do modelo de Nageswararao são determinadas, este estará calibrado e pronto para simular.

Vale lembrar que para calibrar o modelo de Nageswararao é necessário realizar pelo menos um teste com o minério para obter a curva padrão de partição do sistema, que servirá para simulações futuras. Uma vez que o modelo tem por premissa fundamental que esta curva independe das condições de operação do ciclone e é válida para equipamentos que guardem aproximadamente as mesmas relações geométricas entre seus elementos.

Os símbolos que aparecem nas equações 4.3 a 4.6 estão discriminados na nomenclatura que se segue:

$\alpha$	=	coeficiente de inclinação da curva padrão de partição
$\lambda$	=	$\frac{10^{1,82C_v}}{8,05(1 - C_v)^2}$ termo de correção para sedimentação retardada
$\rho_p$	=	densidade da polpa (t/m <sup>3</sup> )
$\theta$	=	ângulo da seção cônica (°)
$C_v$	=	concentração de sólidos em volume (decimal)
$d_{50c}$	=	diâmetro mediano de separação (mm)
$R_f$	=	recuperação de água no <i>underflow</i> (%)
$R_v$	=	recuperação volumétrica de polpa no <i>underflow</i> (%)
$Q_f$	=	vazão volumétrica de polpa na alimentação do ciclone (m <sup>3</sup> /h)
$P$	=	pressão na alimentação do ciclone (kPa)
$L_c$	=	comprimento da seção cilíndrica (m)
$K_w$	=	constante da equação relativa a recuperação de água
$K_v$	=	constante da equação relativa a recuperação de polpa
$K_D$	=	constante da equação relativa ao diâmetro mediano de separação
$K_Q$	=	constante da equação relativa a vazão
$g$	=	aceleração gravitacional (m/s <sup>2</sup> )
$D_u$	=	diâmetro do apex (m)
$D_o$	=	diâmetro do vortex (m)
$D_i$	=	diâmetro equivalente do orifício de entrada (m)
$D_c$	=	diâmetro do ciclone (m)

#### 4 ESTUDO DE CASO I – PLANTA PILOTO

O primeiro estudo de caso foi realizado com base em um ensaio de escala piloto, que processou minério de cobre. O trabalho foi conduzido em Santiago do Chile, com objetivo de dimensionar um futuro circuito industrial de moagem, composto por um moinho com bolas e ciclones. Uma vez que este trabalho consiste numa aplicação prática, foi proposto um circuito de configuração direta e capacidade nominal de  $2 \times 10^6$  t/ano (MTPA).

A instalação da planta piloto era constituída por um moinho com diâmetro de 3' e comprimento de 4', ambos nominais, que operava com nível de enchimento de bolas igual a 35% e com velocidade de rotação correspondente a 70% do valor crítico. A classificação era realizada através de um classificador espiral. O fluxograma do circuito está representado na figura abaixo.

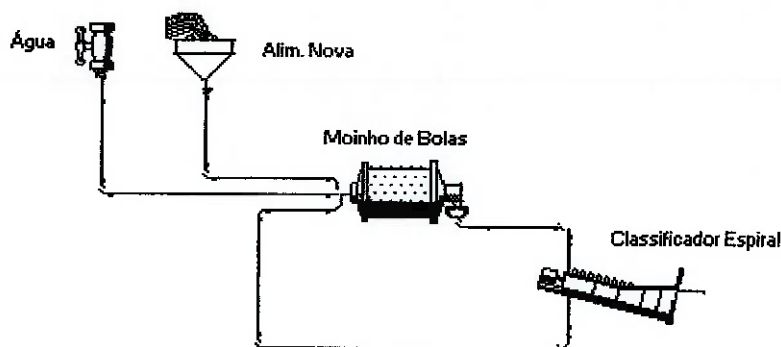


Figura 4.1 – Layout da Planta Piloto

Durante o ensaio no circuito, mediu-se a potência líquida média em 6,2 kWh/t. O WI obtido a partir de amostra de alimentação da planta piloto resultou em 17,8 kWh/t. Também foi medido o peso específico do minério em 3,1 g/cm<sup>3</sup>.

Foram realizadas amostragens na planta, para que fossem levantados dados referentes a granulações e vazões dos fluxos, com o fim de calibrar os modelos matemáticos para realizar futuras simulações. Os dados coletados podem ser visualizados na Figura 4.2, Tabela 4.1 e em detalhe no ANEXO 1.

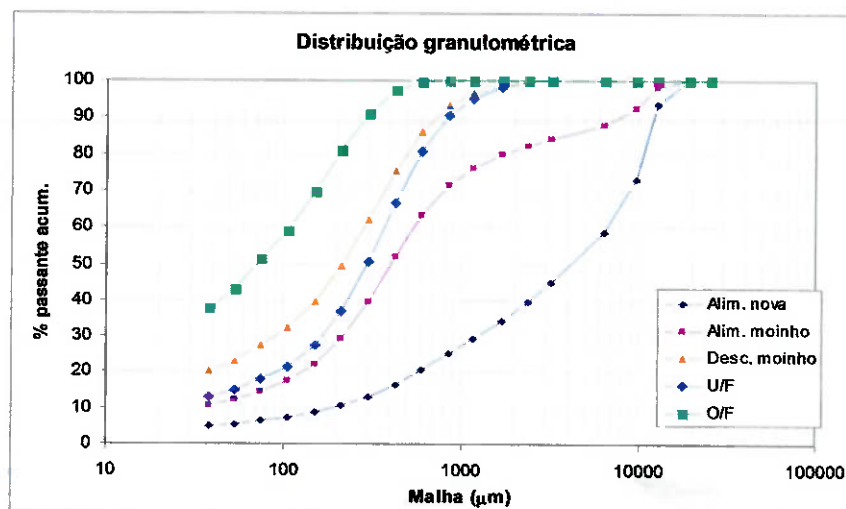


Figura 4.2 – Distribuição granulométrica amostrada dos fluxos

		Alim. Nova	Alim. Moinho	Descarga Moinho	U/F	O/F
Sólidos	kg/h	425.2	1474.8	1474.8	1049.6	425.2
% da Alim. Nova	%	100.0	346.9	346.9	246.9	100.0
Água	l/h	16.8	612.2	612.2	298.0	314.3
Polpa	kg/h	442.0	2087.0	2087.0	1347.6	739.5
Polpa	l/h	158.0	1102.2	1102.2	646.7	455.5
Densidade da polpa	g/l	2796.9	1893.5	1893.5	2038.9	1623.3
Concentração de sólidos	%	96.2	70.7	70.7	77.9	57.5

Tabela 4.1 – Informações sobre os fluxos

#### 4.1 BALANÇO DE MASSAS

A primeira etapa do trabalho, após a obtenção dos dados experimentais, consistiu em verificar a consistência dos dados amostrados através da realização de um balanço de massas dos diversos fluxos da operação. Esta etapa se fez necessária, porque os valores experimentais contêm erros. Este balanço foi realizado no programa JKSimMet, que se baseia no princípio de conservação de massa ao longo de um circuito de beneficiamento mineral.

O programa utilizado busca a minimização da soma dos quadrados das diferenças entre os valores medidos e os valores calculados. Em função disso uma boa ponderação dos erros dos valores experimentais depende da experiência do usuário no fechamento do balanço, isto significa que o usuário deve dar mais confiança (atribuir desvios menores) aos dados onde a amostragem foi realizada com mais qualidade.

Como resultado desta etapa foram obtidas as distribuições granulométricas dos fluxos. Estas foram comparadas com as experimentais para que se verificasse a consistência da amostragem. O que pode ser observado no ANEXO 2 e também figura 4.3 que se segue:

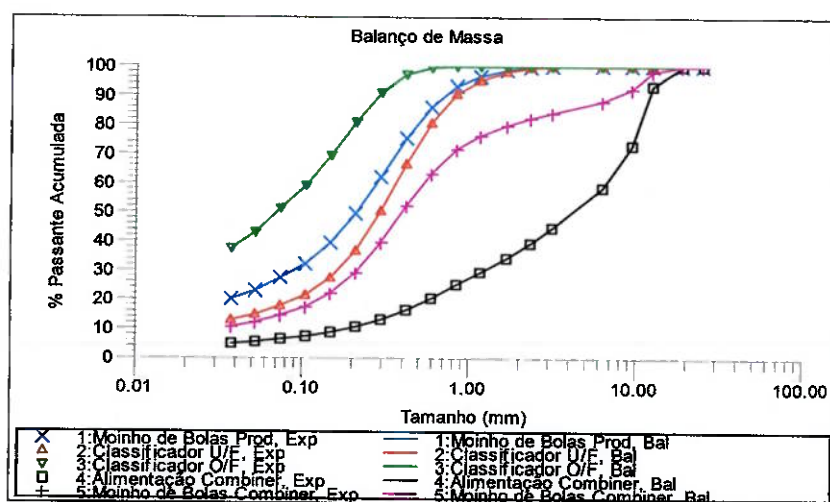


Figura 4.3 – Distribuições granulométricas experimentais e calculadas no Balanço de Massas

Após analisar o gráfico acima, fica evidente a aderência das curvas calculadas pelo simulador aos dados experimentais, o que confirma a boa qualidade da amostragem. Isto exclui qualquer necessidade de ponderar algum dado inconsistente ou que seja realizada uma nova amostragem. Devido a isso se torna possível calibrar os modelos matemáticos a partir dos dados amostrados sem maiores dificuldades.

## 4.2 AJUSTE DOS MODELOS – “MODEL FIT”

Esta etapa é um procedimento que antecede a simulação, sendo de grande importância devido à sua influência direta na qualidade e coerência das respostas que serão obtidas em futuras simulações. Como já enfatizado anteriormente, os modelos encontram-se devidamente calibrados quando as constantes presentes nas expressões matemáticas dos modelos foram determinadas.

A calibração dos modelos foi feita em etapas, pois desta forma eles são refinados, primeiramente a cada equipamento e depois em conjunto, isto é feito para que sejam reduzidos os desvios atribuídos ao ajuste do modelo. Os modelos foram assim calibrados de acordo com a seguinte sequência: moinho de bolas, classificador e finalmente o circuito integrado.

### 4.2.1 Moinho de Bolas

A calibração do modelo de moinho com bolas consiste no cálculo do parâmetro  $r/d^*$ . Para este trabalho, não foram realizados testes de caracterização do minério, ou seja, a função distribuição de quebra ( $a_{ij}$ ) não foi definida, sendo usada a função padrão disponível no simulador.

Nesta etapa ficaram definidos os valores de três nós da função  $r/d^*$  e utilizou-se o método *spline function* (pontos conectados por linhas suaves) para cobrir toda a faixa granulométrica estudada. Esses valores foram dados de entrada para a futura calibração do modelo integrado com o classificador e podem ser visualizados Tabela 4.2.

Nó	Tamanho (mm)	Ln R/D* (calc)
1	0,0750	-0,541
2	0,212	-0,286
3	1,70	2,845
4	12,70	8,603

Tabela 4.2 – Taxa de quebra  $r/d^*$  determinadas na calibração do moinho de bolas

### 4.2.2 Classificador

Como na planta piloto estudada não foram utilizados ciclones, mas sim um classificador espiral, não aplicou-se o modelo de Nageswararao para o ajuste do classificador, mas sim um modelo da curva de partição do processo.

Os parâmetros que regem o modelo da curva de partição são: a inclinação ( $\alpha$ ) da curva no segmento próximo ao  $d_{50c}$ , o diâmetro mediano da separação ( $d_{50c}$ ) e a partição de água do *underflow* ( $R_f$ ). Os valores que foram obtidos para os parâmetros da curva de partição serviram de dados de entrada para o ajuste global e são mostrados na Tabela 4.3 a seguir.

Parâmetro	Valor
Forma da Curva de Eficiência – Alfa ( $\alpha$ )	1.489
Partição de água ao U/F (%)	55.61
Diâmetro mediano da separação - $d_{50c}$ (mm)	0.227

Tabela 4.3 – Valores do modelo da curva de eficiência de partição obtidos no ajuste

### 4.2.3 Global (Classificador + Moinho de Bolas)

Neste último ajuste a integração dos modelos foi realizada após a calibração descrita dos modelos particulares. Os valores dos parâmetros obtidos nos tópicos anteriores serviram de entrada nesta etapa, fazendo com que o simulador fosse direcionado a um melhor ajuste.

O objetivo desta seção foi obter os parâmetros definitivos e integrados dos modelos matemáticos do moinho de bola e do classificador, de forma a estarem bem ajustados aos dados experimentais e, portanto, representarem bem a operação a ser simulada. Os resultados desta fase podem ser visualizados em detalhes no ANEXO 3 e também, de forma mais sucinta e objetiva, na Figura 4.4.

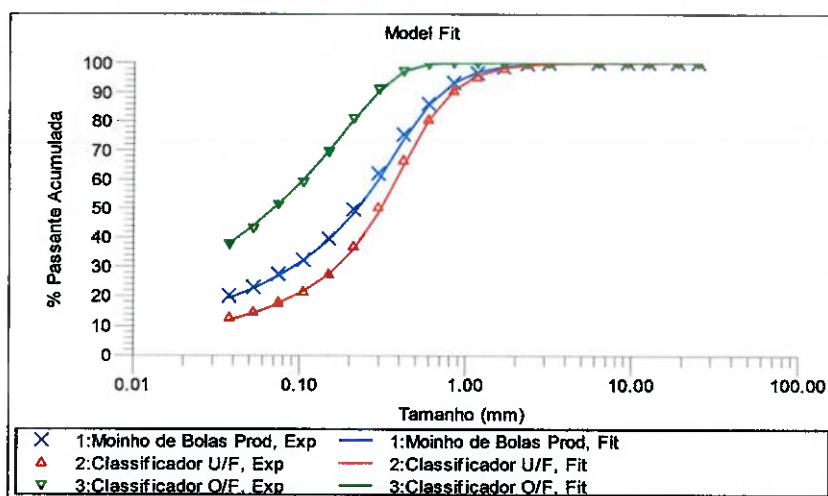


Figura 4.4 – Distribuições granulométricas experimentais e calculadas no ajuste do modelo (*Model Fit*)

No gráfico acima estão representados por pontos os dados experimentais e pelas linhas os modelos ajustado. Assim é possível comprovar de forma visual que o ajuste foi de boa qualidade, ou seja, os modelos estão bem calibrados e representam bem o processo, uma vez que as linhas têm boa aderência aos pontos.

Após ter confirmado a qualidade do ajuste do modelo, é possível utilizar a simulação como uma ferramenta confiável, uma vez que os resultados por ela obtidos representarão bem a operação estudada.

## 4.3 SIMULAÇÕES

Como já fora informado no início deste estudo, o objetivo da simulação foi dimensionar um circuito direto de moagem para uma capacidade nominal de 2 MTPA. Para isso foi estimado que a usina funcionaria 365 dias/ano 24 h/dia com um fator de utilização de 92%. Desta forma a capacidade nominal, obtida para que se desse início às simulações foi de 242 t/h.

As simulações se dividiram em duas partes, sendo que a primeira foi dimensionar o moinho de bolas e a outra, escolher os ciclones que melhor se adequassem à operação.



### 4.3.1 Moinho de Bolas

Para dimensionar o moinho de bolas manteve-se a curva de eficiência como modelo de partição, com o fim de somente se reproduzir a partição experimental.

O próximo passo foi iniciar um processo iterativo no simulador de seleção de diâmetros e comprimentos de moinho, sempre mantendo constantes as características da operação experimental, ou seja, grau de enchimento do moinho, fração da velocidade crítica e WI do minério. Isto foi feito até que fosse determinada uma combinação de diâmetro e comprimento que melhor reproduzisse a curva de produto que fora anteriormente ajustada.

A simulação indicou um moinho de 19,5' x 25' com 4247 kW de potência no pinhão. Os resultados desta etapa estão no ANEXO 4 e as curvas de distribuições granulométricas obtidas comparadas às experimentais podem ser observadas na Figura 4.5 que se segue.

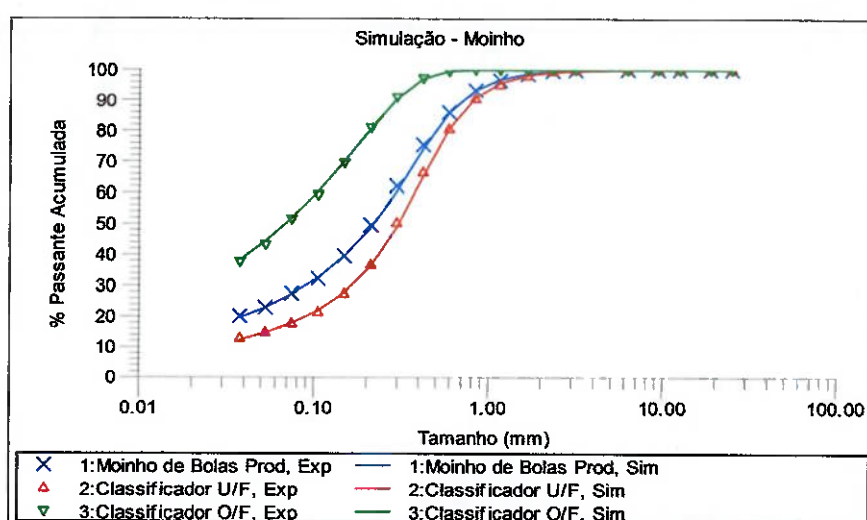


Figura 4.5 – Distribuições granulométricas experimentais e calculadas na simulação do moinho

A qualidade da simulação pode ser visualizada na figura acima, a qual indica que as curvas simuladas têm boa aderência aos pontos experimentais.

### 4.3.2 Ciclones

O dimensionamento da bateria de ciclones, a ser utilizada para reproduzir a partição experimental, foi feito separadamente, tendo como referência as curva de distribuição granulométrica obtidas nos exercícios de balanço de massas. Sendo posteriormente avaliada em conjunto com o moinho previamente dimensionado.

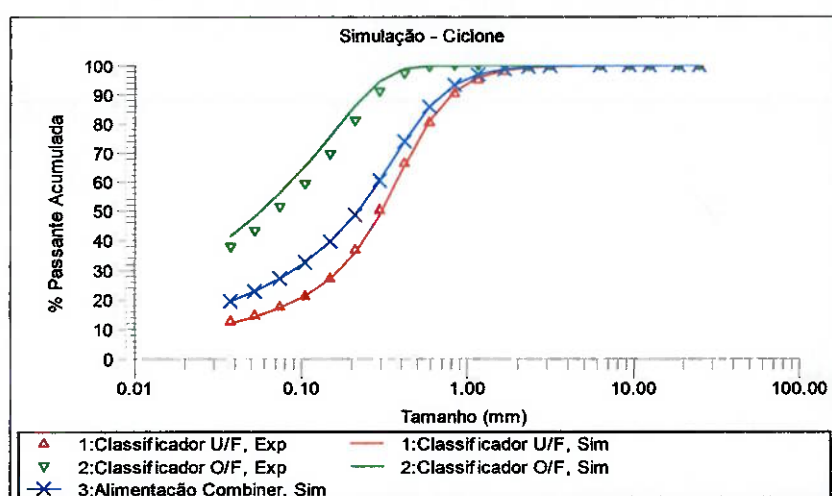
O dimensionamento se deu através de um processo iterativo, onde diferentes combinações de ciclones e concentração de sólidos na alimentação foram tentadas com intuito de buscar a combinação de variáveis de entrada no modelo matemático de Nageswararao que melhor reproduzisse a partição de referência.

Vale lembrar que de forma ideal, o modelo de Nageswararao deve ser calibrado a partir de dados experimentais. No presente exercício, no entanto, as simulações foram baseadas nas constantes médias do modelo.

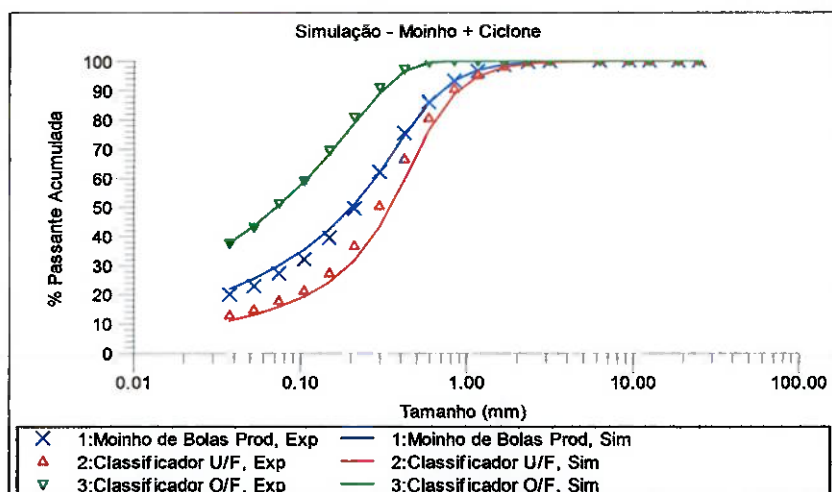
O primeiro resultado da simulação foi uma bateria de 4 ciclones de 26", com uma combinação adequada de suas dimensões e concentração de sólidos na sua alimentação.

Tem-se assim uma primeira aproximação válida. Em fases mais avançadas de projeto recomenda-se realizar ensaios com o minério no ciclone, para que sejam determinadas as constantes específicas do binômio minério/equipamento, de forma a escolher definitivamente o equipamento a ser utilizado.

Após ser pré-selecionada, a bateria de ciclones mencionada foi combinada com o moinho escolhido para que fosse simulado todo o conjunto. Após ajustes foi selecionada uma bateria de 3 ciclones de 26", Maiores detalhes deste dimensionamento estão no ANEXO 5 e os gráficos do primeiro ajuste e do final podem ser vistos nas Figuras 4.6 e 4.7 que seguem.



**Figura 4.6 – Distribuições granulométricas experimentais e calculadas na simulação do ciclone**



**Figura 4.7 – Distribuições granulométricas experimentais e calculadas na simulação do ciclone + moinho**

#### 4.4 DIMENSIONAMENTO PELO MÉTODO DE BOND

Como o presente trabalho visa estudar o funcionamento tanto do modelo matemático quanto do modelo energético para uma análise da aplicabilidade de ambos, foi utilizado então o método de Bond para dimensionar o circuito segundo a ótica energética.

Através deste método foi possível escolher somente o moinho a ser utilizado, uma vez que ele admite um classificador padrão. Para isso foram levados em conta dados como, WI laboratorial e  $P_{80}$  da alimentação e produto.

Tendo como dados iniciais o valores de WI,  $P_{80}$  e  $F_{80}$  amostrados, foi obtido através da relação energética (Fórmula 1.2) o resultado do dimensionamento por este método. Sendo assim ficou determinado que seria necessário um moinho com 3863 kW (5178 HP) de potência, já com os fatores de Rowland aplicados, para conseguir a relação de redução desejada.

Para a escolha do equipamento foi consultado o manual METSO 6ª Edição, cujo maior moinho tem 18 pés de diâmetro, sendo assim a fórmula (1.4) foi utilizada para correção do comprimento. Após isso foi selecionado um moinho de 18 x 30 pés e maiores detalhes sobre esta etapa podem ser consultados no ANEXO 6.

##### 4.4.1 Resultado do Método de Bond no Simulador

Como resultado do dimensionamento por Bond foi obtido um moinho com diâmetro de 18 por 30 pés de comprimento. Visando a uma comparação direta, o diâmetro do moinho simulado pelo PBM foi fixado em 18' e, através de interações, calculado o comprimento, até obter-se um bom ajuste.

Após algumas simulações foi verificado que o comprimento de 30 pés forneceu o melhor ajuste, como pode ser observado na Figura 4.8 abaixo, maiores detalhes sobre os resultados obtidos podem ser vistos no ANEXO 6.1.

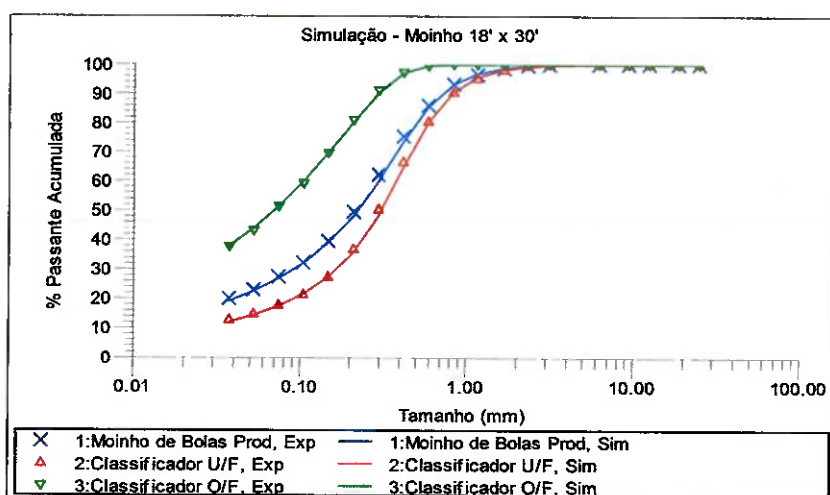


Figura 4.8 – Distribuição granulométrica experimentais e simuladas para o moinho de 18' x 30'

Sendo assim ficou evidente que a ferramenta matemática alcançou os mesmos resultados no dimensionamento de equipamentos que o já consolidado modelo de Bond, que vem sendo utilizado a mais de 50 anos no dimensionamento de moinhos.



## 5 CASO II - OTIMIZAÇÃO DE UM CIRCUITO DE MOAGEM

Nesta seção buscou-se aplicar tanto o método de modelagem matemática (PBM), quanto modelo energético de Bond para modelar um circuito de moagem de minério de ouro em operação. Para isso, após o modelamento, foram visualizados alguns cenários e diante destes buscou-se otimizar o circuito em questão.

O circuito em questão é composto por duas linhas paralelas (A e B) de moagem, cada uma delas composta por um moinho de 3,27 m x 3,70 m com motor de 800 HP. Mas devido ao fato das duas serem muito semelhantes, somente a linha A, cuja amostragem foi previamente considerada mais consistente, foi utilizada no exercício de otimização e suas características estão apresentadas na tabela 5.1.

Diâmetro Interno	Comprimento	Grau de Enchimento	% da Velocidade Crítica	Tamanho Máximo das Bolas
3,27m	3,70m	32%	72,7% = 17 rpm	3 ½"

**Tabela 5.1 – Informações sobre o moinho da linha A**

A classificação é realizada em cada linha por um único ciclone em operação, da marca KREBBS\_CIMAQ, modelo d26B-1131 completo com revestimento, vortex finder de 8" de diâmetro e Apex de 5". A pressão de operação é de 0,5 kgf/cm<sup>2</sup> (50 kPa).

Realizou-se uma série de amostragens na planta segundo um plano que encontra-se no ANEXO 7. Foram levantados dados referentes às granulações e vazões dos fluxos, com o fim de calibrar os modelos matemáticos. Foi determinado o WI de alimentação do circuito, que resultou em 10,79 kWh/t. Os dados obtidos podem ser visualizados na Tabelas 5.2 abaixo e maiores informações estão presentes no ANEXO 8.

Fluxo	% de Sólidos	Vazões			
		Polpa (m3/h)	Polpa (t/h)	Água (m3/h)	Sólidos (t/h)
Desc. Moinho	72,5	105	203,4	55,8	147,5
Alim. Cycl.	43	244,7	343,1	195,6	147,5
UF	82,8	55,4	126,3	21,7	104,6
OF	19,8	189,2	216,9	173,9	43

**Tabela 5.2 – Informações sobre as vazões dos fluxos da linha A**

### 5.1 BALANÇO DE MASSAS

O primeiro passo, após a obtenção dos dados experimentais, consistiu em analisar a consistência dos mesmos realizando um balanço de massa dos diversos fluxos da cada linha estudada. Esta etapa, como já comentado anteriormente é necessária, pois os valores experimentais carregam erros e estes devem ser comensurados.

O balanço foi realizado no JKSimMet e os resultados revelaram as discrepâncias entre os dados experimentais e os calculados pelo simulador. Estes podem ser visualizados em detalhes no ANEXO 9 e também visualmente na figura 5.1 para a linha A.

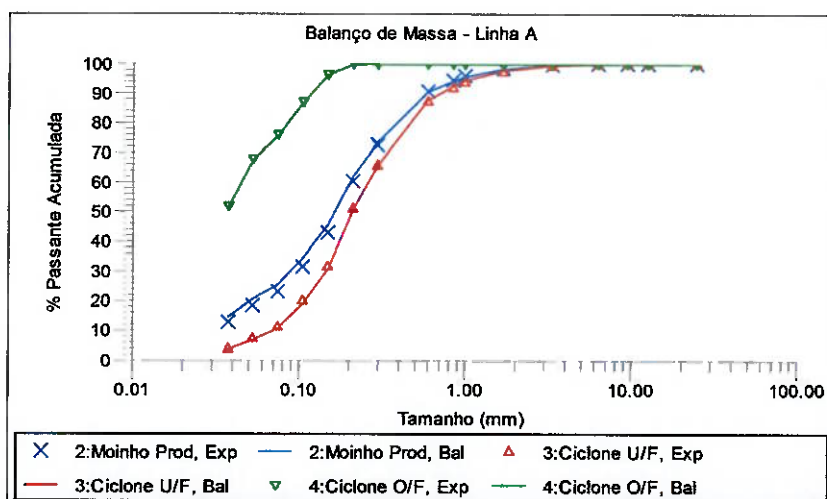


Figura 5.1 – Distribuições granulométricas experimentais e calculadas no balanço de massas da Linha A

O gráfico apresentado indica uma inconsistência dos dados amostrados no produto do moinho. Este resultado é condizente com a dificuldade em amostrar a saída do produto do moinho.

## 5.2 AJUSTE DOS MODELOS – “MODEL FIT”

A calibração dos modelos se deu em duas etapas. Na primeira delas foi feito o ajuste individual do moinho e do ciclone. Em seguida ajusto-se todo o conjunto, ou seja, moinho e ciclone juntos. Isto é feito para aumentar a precisão do ajuste, pois, as constantes de cada modelo são pré-determinadas separadamente para que depois possam ser sintonizadas em conjunto.

No ajuste do moinho de bolas foram calculados os valores da função taxa de quebra ( $r/d^*$ ) para três nós. Os resultados desta etapa estão no ANEXO 10 e podem ser visualizados de maneira mais objetiva e ilustrativa a seguir na Figura 5.2.

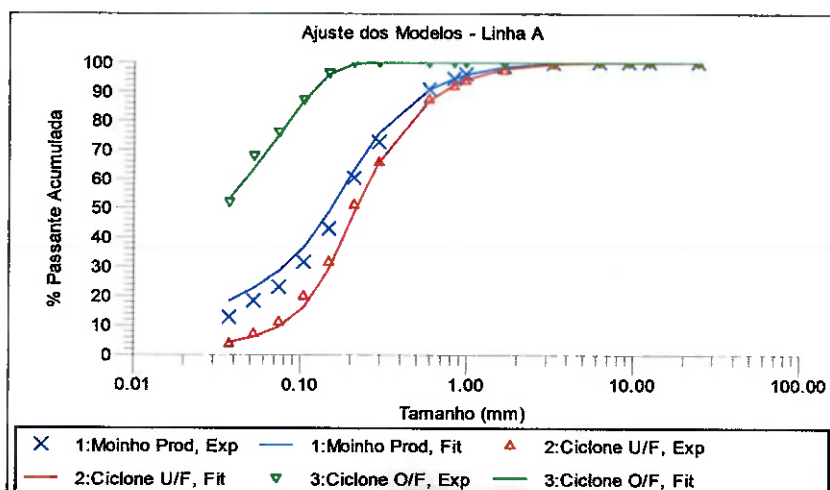


Figura 5.2 – Distribuições granulométricas experimentais e calculadas no *Model Fit* da Linha A

As curvas da Figura 5.2 mostram boa aderência aos dois produtos do ciclone e discrepância na parte mais fina da alimentação desse equipamento. Esses resultados são função das dificuldades já comentadas de amostragem desse fluxo, que assim se refletiram na qualidade das amostras e, conseqüentemente, nos ajustes dos modelos.

### 5.3 SIMULAÇÕES

Tendo por referência os valores resultantes da calibração dos modelos, foi criado o assim chamado caso base, com o qual as demais simulações serão comparadas. Sendo assim, o circuito alvo dos estudos está representado na Figura 5.3 que se segue.

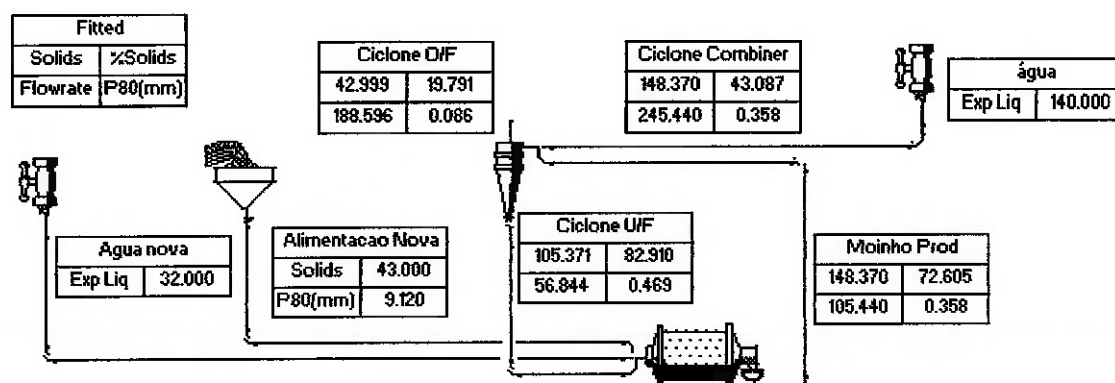


Figura 5.3 – Layout da Linha A com seus valores ajustados para a simulação

Na calibração do modelo de bond foi primeiramente empregada a equação (1.2) para determinar o *Work Index* operacional ( $WI_o$ ). Para o cálculo deste utilizam-se os valores de  $F_{80}$ ,  $P_{80}$ , vazão de alimentação do circuito e potência no pinhão na mesma equação (1.2) de forma que a única variável restante é o  $WI_o$ .

Em seguida, foram aplicados os fatores de Rowland ao  $WI_o$  para se obter o *Work Index* operacional corrigido ( $WI_{oc}$ ), usando a seguinte relação,  $WI_{oc} = WI_o/EF_i$ . Os cálculos referentes a esta etapa encontram-se no ANEXO 11 e estes apontaram  $WI_{oc}$  de 12,23 kWh/t.

Para efeito de comparações foi aplicado o método de dimensionamento de moinhos de Bond com o WI de laboratório e com o operacional corrigido, para que fosse checada a qualidade deste ajuste. Com WI laboratorial foi obtido um moinho de 11' x 11' e com o  $WI_{oc}$  um de 11,5' x 12, neste último, coincidindo com o tamanho real e confirmando a boa qualidade do ajuste. Os cálculos estão no ANEXO 12.

As simulações que se seguem nos próximos itens tiveram por objetivo estabelecer alguns cenários de forma a prever efeitos das mudanças ou até analisar a possibilidade de algumas alterações no circuito em questão. Os cenários propostos foram, aumento na taxa de alimentação, alimentação de minério mais competente (WI maior) e moagem mais fina.

#### 5.3.1 Aumento na taxa de alimentação do circuito

O cenário explorado na situação foi de um aumento na taxa de alimentação do circuito de 10 t/h. Inicialmente foi analisado o efeito imediato desta alteração e posteriormente, efetuadas alterações na operação visando obter o produto com granulação similar à do caso base.

Com o modelo matemático observou-se de imediato uma diminuição da porcentagem passante acumulada das partículas de tamanho médio do produto do moinho e consequentemente, no *overflow* e *underflow* do ciclone, como se observa na Figura 5.4.

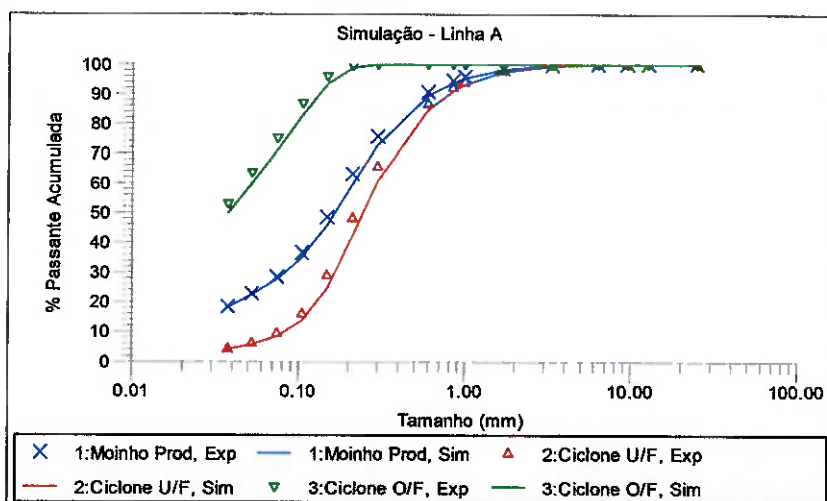


Figura 5.4 – Distribuições granulométricas resultante do aumento da taxa de alimentação

Para obter o produto original e mesma carga circulante seria necessário aumentar a taxa de quebra das partículas de tamanho médio. Para isso adotou-se a estratégia de reduzir o diâmetro das bolas de 3½" para 3", mantendo o mesmo grau de enchimento. O resultado dessa mudança foi um produto final praticamente igual ao caso base, vide Figura 5.5 e ANEXO 13.

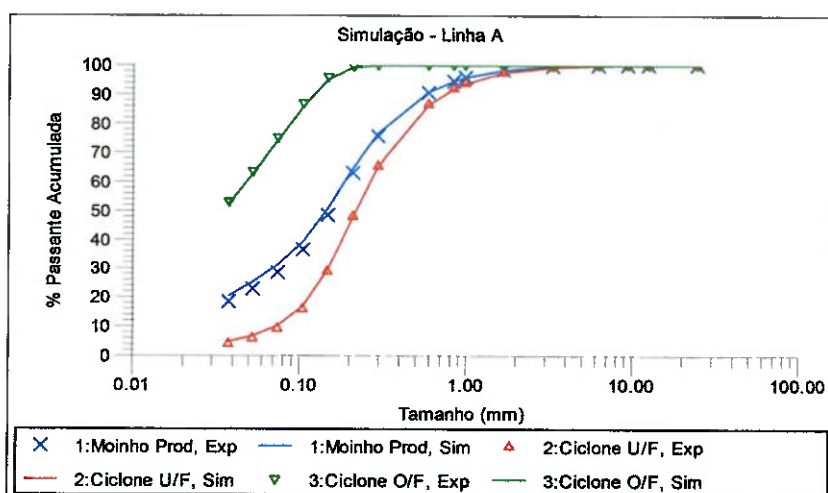


Figura 5.5 – Distribuições granulométricas resultante da redução do tamanho das bolas

O modelo de Bond foi aplicado à situação de aumento simples na alimentação do circuito. Assim, mantendo-se constante a potência e granulação de alimentação, um aumento de 10 t/h na alimentação correspondeu um produto do circuito de 0,124 mm, ante aos 0,086 mm do caso base.

De acordo com a equação de Bond, para se obter um produto com o mesmo P80 do caso base seria necessário fornecer mais potência no pinhão. Neste caso, para o aumento de 10 t/h a potência necessária será de 879 HP ante os 713 HP do caso base. Portanto seria preciso trocar o motor existente, uma vez que a potência deste era de 800 HP.

Admitindo-se a troca do motor, para tal incremento de potência seria preciso aumentar a carga de bolas ou a velocidade de rotação. Para o primeiro caso, admitindo a relação  $Pot = K \times GE \times (1 - GE)$ , fornecida pelo prof. Homero Delboni, tem-se que não é possível chegar em 879 HP somente alterando a carga de bolas. O mesmo ocorre com a velocidade de rotação, uma vez que a potência varia linearmente com esta, não atingindo a potência requerida.

Em uma situação hipotética, para se chegar em 879 HP seria aumentado o grau de enchimento para 45%, chegando-se em 811 HP e em seguida ajustar a velocidade de rotação para 78,9% da crítica obtendo-se os 879 HP requeridos para conseguir um produto com  $P_{80}$  de 0,086 mm. Vale ressaltar que com este método se fez necessária a troca do motor, além de prováveis limitações no grau de enchimento e outros efeitos na mudança acentuada de rotação do moinho.

### 5.3.2 Alimentação com minério mais resistente de maior WI

Neste cenário buscou-se reproduzir a mudança no *Work Index* do minério de alimentação da usina. Para efeito de aplicação e cálculos foi estimado um novo WI de 15 kWh/t ante o valor de 10,79 kWh/t do caso base. Sendo assim, foi observado o efeito da mudança e também foram aplicados os modelos para buscar alterar variáveis do processo de forma a obter o mesmo produto anteriormente produzido.

O modelo matemático revelou que o efeito desta mudança é a redução da taxa de quebra de praticamente toda faixa granulométrica, refletindo assim em uma granulação mais grossa no produto do moinho, como poder ser observado na figura 5.6.

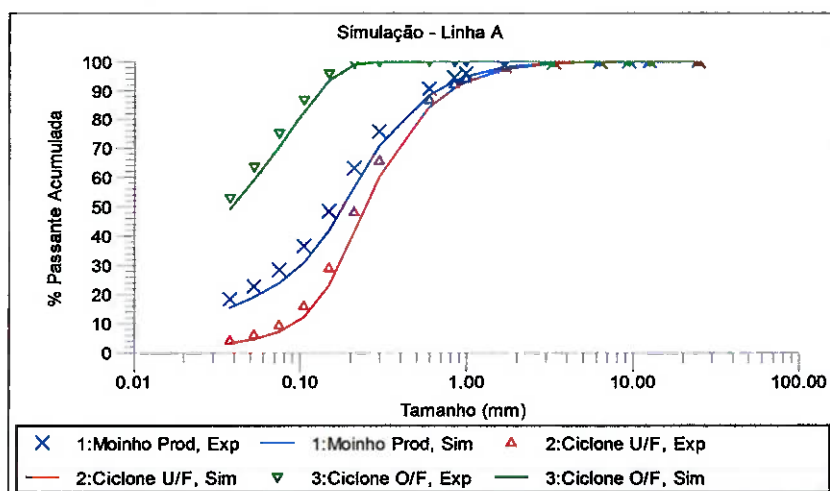


Figura 5.6 – Distribuições granulométricas resultante da mudança no WI do minério

De forma a produzir o mesmo produto e carga circulante do caso base procurou-se primeiro soluções que não envolvessem aumento da potência requerida, ou seja, reduzir o tamanho das bolas de 3½" para 3". Mesmo assim, não foi possível obter o produto requerido e para isso aumentou-se a carga de bolas de 32% para 35%, incrementando a potência requerida no pinhão calculada pelo simulador, de 700 HP para 740 HP. Com essas modificações foi obtido um ajuste praticamente perfeito das distribuições granulométricas e carga circulante, como pode ser observado na Figura 5.7 a seguir e também no ANEXO 14.



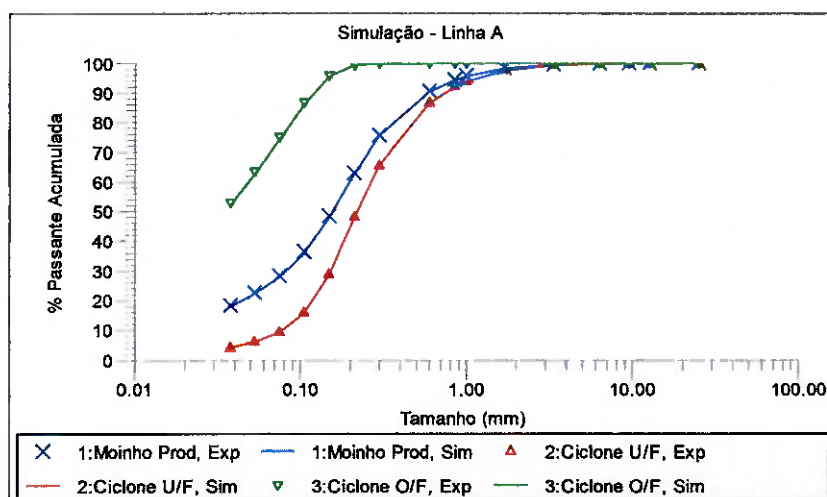


Figura 5.7 – Distribuições granulométrica simuladas após ajuste das variáveis

Com a abordagem de Bond levando em conta o mesmo método de cálculo do item anterior, foi determinado que o novo  $P_{80}$  seria de 0,124mm. Nesse caso entretanto, para atingir a granulação do produto do caso base, calculou-se que a potência no pinhão teria que passar de 714 HP para 874 HP.

Coincidentemente os valores ficaram muito parecidos com o do caso anterior, sendo assim adotou-se a mesma solução, aumentando o grau de enchimento de 32% para 45% e a velocidade de rotação de 72,7% para 78,4%. Deve ser enfatizado que tal solução de Bond implicaria na troca do motor.

### 5.3.3 Produto mais fino

O terceiro cenário consistiu na necessidade de um produto de moagem mais fino, com  $P_{80}$  de 200# (0,075mm) ante os 0,086 mm do caso base. Nesse cenário considerou-se como constante a granulação de alimentação e taxa de alimentação do circuito. Várias alternativas podem ser abordadas no modelo matemático, enquanto que no enfoque do Bond as alterações estão limitadas à potência no pinhão, para isso aumentando o grau de enchimento e/ou a velocidade de rotação.

A estratégia adotada para os modelos matemáticos foi trabalhar com o corte do ciclone e ajustar o moinho para esta mudança. Para isso a polpa de alimentação do ciclone foi diluída de 43% para 40% de sólidos, mas isto implicou de imediato numa maior carga circulante. Sendo assim o segundo passo foi aumentar a taxa de quebra da partículas de pequeno tamanho que deixaram de sair do circuito pelo O/F e isto foi conseguido reduzindo o diâmetro das bolas de 3½" para 3".

Com as simulações foi calculado que o novo  $P_{80}$  seria de 0,074mm. Os resultados desta simulação encontram-se em detalhes na Tabela 5.3 e na Figura 5.8 que se seguem.

Equipamento	Fluxo	Sólidos (t/h)		% Sólidos		d <sub>80</sub> (mm)	
		Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
Alimentação	Nova	43	43	95	95	9,12	9,123
Moinho	Alim.	148,4	150,5	72,6	72,64	24,6	2,812
Moinho	Prod	148,4	150,5	72,6	72,64	0,358	0,3
Ciclone	Alim.	148,4	150,5	43	40	24,6	0,3
Ciclone	U/F	105,4	107,3	82,91	82,7	0,469	0,403
Ciclone	O/F	43	43,16	19,79	17,51	0,0861	0,0738

Tabela 5.3 – Informações dos fluxos após simulação

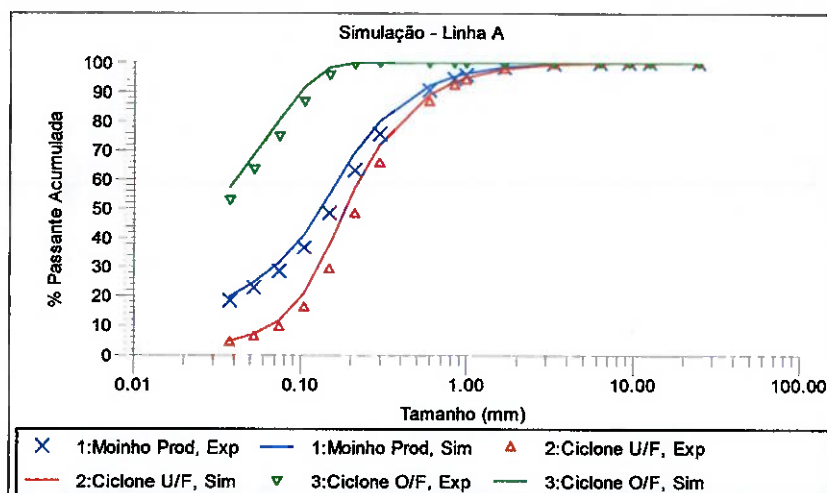


Figura 5.8 – Distribuições granulométricas simuladas em comparação com as ajustadas

Aplicando o método de Bond, o primeiro passo foi determinar a mudança na potência requerida no pinhão para obter o produto mais fino desejado. Como resultado deste cálculo, que foi feito utilizando-se a equação (1.2), ficou determinado que a potência deveria mudar de 713 HP para 769HP.

Admitindo que as perdas mecânicas e elétricas entre a potência conectada ao motor e aquela disponível no pinhão sejam de aproximadamente 5%, a potência requerida para o motor será de 809 HP ( $769/0,95$ ), fazendo com que novamente seja necessária a troca do motor, que é de 800 HP.

Levando-se em consideração o motor e tomando a relação  $Pot = K \times GE \times (1 - GE)$ , é possível determinar que aumentando o grau de enchimento para 38%, será obtida a potência desejada.

## 6 CONCLUSÕES

A revisão bibliográfica apresentada neste trabalho buscou ilustrar ao leitor de forma clara e objetiva os conceitos envolvidos em simulação, de forma a dar o devido conhecimento para a compreensão do desenvolvimento do trabalho.

Durante o desenvolvimento do trabalho foram descritos e aplicados os procedimentos que de vem ser seguidos tanto na modelagem matemática quanto na abordagem energética de um circuito industrial de moagem e classificação.

Os objetivos principais do trabalho foram alcançados, uma vez que foram desenvolvidas plataformas de modelos ajustados para a simulação para o caso da planta de escala e também para o circuito industrial. Nos ajustes dos modelos e também nas simulações efetuadas foi possível aplicar os conceitos e analisar o funcionamento de cada método, ficando clara as suas aplicabilidades.

As plataformas de simulação obtidas neste trabalho foram exploradas para se chegar aos objetivos, que eram a aplicação e o entendimento dos métodos. Estas poderiam e podem ainda ser utilizadas para futuras simulações, estudos mais aprofundados e investigações mais detalhadas e abrangentes envolvendo variações dos muitos parâmetros operacionais que regem as operações.

As simulações realizadas revelaram a grande aplicabilidade da ferramenta matemática de simulação, a qual já esta bastante sedimentada no meio de tratamento de minérios, tanto para analisar o funcionamento de circuitos industriais, como desenvolver alternativas para a melhoria do desempenho destes. A robustez desta ferramenta fica evidente quanto se tem em vista a quantidade de variáveis que ela pode controlar.

O clássico e extremamente difundido método de Bond revelou resultados semelhantes aos resultantes do modelamento matemático para dimensionamento de moinhos de bolas. Entretanto exercícios de otimização de circuitos industriais de moagem revelaram limitações importantes do modelo de Bond, uma vez que este não inclui efeitos como tamanho de bolas e eficiência do classificador. Esses aspectos foram explorados com sucesso pelo modelo matemático adotado, mostrando assim ser mais abrangente em tais aplicações.



## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUSTIN, L.G.; KLIMPEL, R.R.; LUCKIE, P.T. **Process engineering of size reduction**. New York, N.Y. : Society of Mining Engineers of the AIME, 1984. xi, 561 p. : ill. ; 24 cm

BOND, F. C. **The third theory of comminution**. Transactions of the American Institute of Mining and Metallurgical Engineers. v. 193, p. 484-494, 1952.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. **Teoria e Prática do Tratamento de Minérios - Britagem, Peneiramento e Moagem**. v.3. São Paulo: Signus, 1999.

DELBONI JUNIOR, H. **Ajuste de modelos empíricos de operação de ciclones**. São Paulo, 1989. 182 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

DELBONI JUNIOR, H. **Circuitos de Cominuição e Classificação de Minérios**. Apostila, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

DELBONI JUNIOR, H. **Modelagem de Operação de Moinhos de Bolas**. Apostila do curso de pós-graduação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

GIROLAMO, DIOGENES DE. **Considerações sobre a utilização de modelos matemáticos para a operação de moagem**. São Paulo, 1997. 81p + anexos. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

JKSimMet - **Steady State Mineral Processing Simulator** - Version 5.2, JKTech, JKMRC, Australia, 1999.

KING, R. P 1938- (RONALD PETER). **Modeling and simulation of mineral processing systems**. Boston : Butterworth-Heinemann, 2001. ix, 403 p. : ill. ; 24 cm.

TAVARES, L. M. Um novo método para o Cálculo da Eficiência Energética de Moinhos Industriais. **Revista Matéria**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 1, 2001.

LYNCH, A. J. **Mineral crushing and grinding circuits – Their simulation, optimization and control**. Amsterdam; New York : Elsevier Scientific Pub. Co.: distributors for the U.S. and Canada, 1977. xii, 342 p. : ill. ; 25 cm.

NAPIER-MUNN, T.J.; MORREL, S.; MORRISON, R.D.; KOJOVIC, T. **Mineral Comminution Circuits: Their Operation and Optimization**. JKMRC Monograph Series, Brisbane, 1996.

NASCHENVENG, ANDRÉ COSTA. **Modelagem e simulação do circuito de moagem da Ultrafertil**. São Paulo, 2003. 101 p + anexos. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

WHITEN, W. J. **The Simulation of crushing plants with models developed using multiple spline regression**. 10<sup>th</sup> International Symposium on the Application of Computer Methods in the Min. Ind., p. 317-323, Johannesburg, 1972.

# ANEXO 1: Dados da Planta Piloto

## Dados de laboratório:

Moinho: D x L - 3' x 4'

GE: 35%

Vel: 70% da Vc

Pot.: 6,2 kWh/t

WI: 17,8 kWh/t

$\rho_{\text{esp}}$ : 3,1

		Alim. Nova	Alim. Moinho	Descarga Moinho	U/F	O/F
Sólidos	kg/h	425.2	1474.8	1474.8	1049.6	425.2
	%	100.0	346.9	346.9	246.9	100.0
Água	l/h	16.8	612.2	612.2	298.0	314.3
Polpa	kg/h	442.0	2087.0	2087.0	1347.6	739.5
Polpa	l/h	158.0	1102.2	1102.2	646.7	455.5
Densidade da polpa	g/l	2796.9	1893.5	1893.5	2038.9	1623.3
Conc. de sólidos	%	96.2	70.7	70.7	77.9	57.5
Granulometria						
Malha	$\mu\text{m}$	Fração passante %				
1"	25400	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
3/4"	19050	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
1/2"	12700	93.40	98.10	100.00	100.00	100.00
3/8"	9525	73.00	92.22	100.00	100.00	100.00
1/4"	6350	58.40	88.01	100.00	100.00	100.00
1/8"	3175	44.70	83.99	99.93	99.90	100.00
8	2360	39.40	82.17	99.64	99.50	100.00
10	1700	34.30	79.70	98.65	98.10	100.00
14	1180	29.40	76.23	96.58	95.20	100.00
20	850	25.10	71.64	93.23	90.49	100.00
28	600	20.40	63.23	86.04	80.58	99.50
35	425	16.40	52.11	75.41	66.58	97.20
48	300	13.10	39.64	62.09	50.39	91.00
65	212	10.70	29.27	49.51	36.79	80.90
100	150	8.80	22.03	39.53	27.39	69.50
150	106	7.40	17.36	32.26	21.39	59.10
200	75	6.50	14.54	27.45	17.79	51.30
270	53	5.50	12.12	22.96	14.80	43.10
400	38	4.90	10.59	20.02	12.90	37.60

# ANEXO 2: Dados do Balanço de Massa

DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS EXPERIMENTAIS

Malha (mm)	% Passante acum.			
	Alim. Nova	Alim. Moinho	Desc. Moinho	Classificador U/F    O/F
25.40	100.0	100.0	100.0	100.0    100.0
19.05	100.0	100.0	100.0	100.0    100.0
12.70	93.4	98.1	100.0	100.0    100.0
9.53	73.0	92.2	100.0	100.0    100.0
6.35	58.4	88.0	100.0	100.0    100.0
3.18	44.7	84.0	99.9	99.9    100.0
2.36	39.4	82.2	99.6	99.5    100.0
1.70	34.3	79.7	98.7	98.1    100.0
1.18	29.4	76.2	96.6	95.2    100.0
0.850	25.1	71.6	93.2	90.5    100.0
0.600	20.4	63.2	86.0	80.6    99.5
0.425	16.4	52.1	75.4	66.6    97.2
0.300	13.1	39.6	62.1	50.4    91.0
0.212	10.7	29.3	49.5	36.8    80.9
0.150	8.8	22.0	39.5	27.4    69.5
0.106	7.4	17.4	32.3	21.4    59.1
0.075	6.5	14.5	27.5	17.8    51.3
0.053	5.5	12.1	23.0	14.8    43.1
0.038	4.9	10.6	20.0	12.9    37.6
0.000	0.0	0.0	0.0	0.0    0.0

DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS CALCULADAS

Malha (mm)	% Passante acum.			
	Alim. Nova	Alim. Moinho	Desc. Moinho	Classificador U/F    O/F
25.40	100.0	100.0	100.0	100.0    100.0
19.05	100.0	100.0	100.0	100.0    100.0
12.70	93.4	98.1	100.0	100.0    100.0
9.53	73.0	92.2	100.0	100.0    100.0
6.35	58.4	88.1	100.0	100.0    100.0
3.18	44.7	84.0	99.9	99.9    100.0
2.36	39.4	82.2	99.6	99.5    100.0
1.70	34.3	79.8	98.6	98.1    100.0
1.18	29.4	76.3	96.6	95.2    100.0
0.850	25.1	71.7	93.2	90.5    100.0
0.600	20.4	63.3	86.0	80.6    99.5
0.425	16.4	52.2	75.4	66.6    97.2
0.300	13.1	39.7	62.1	50.4    91.0
0.212	10.7	29.3	49.5	36.8    80.9
0.150	8.8	22.1	39.5	27.4    69.5
0.106	7.4	17.4	32.2	21.4    59.1
0.075	6.5	14.6	27.4	17.8    51.3
0.053	5.5	12.1	22.9	14.8    43.1
0.038	4.9	10.6	20.0	12.9    37.6
0.000	0.0	0.0	0.0	0.0    0.0

	% Passante acum.			
	Alim. Nova	Alim. Moinho	Desc. Moinho	Classificador U/F    O/F
Q <sub>sol</sub> (t/h)	0.425	1.475	1.475	1.050    0.425
Q <sub>água</sub> (t/h)	0.017	0.611	0.611	0.298    0.314
Q <sub>polpa</sub> (t/h)	0.442	2.086	2.086	1.348    0.739
% sol	96.2	70.7	70.7	77.9    57.5
ρ <sub>polpa</sub> (t/m³)	2.87	1.92	1.92	2.12    1.64
P <sub>80</sub> (mm)	10.33	1.75	0.49	0.59    0.21

	% Passante acum.			
	Alim. Nova	Alim. Moinho	Desc. Moinho	Classificador U/F    O/F
Q <sub>sol</sub> (t/h)	0.423	1.473	1.473	1.050    0.423
Q <sub>água</sub> (t/h)	0.017	0.611	0.611	0.298    0.313
Q <sub>polpa</sub> (t/h)	0.440	2.084	2.084	1.348    0.736
% sol	96.2	70.7	70.7	77.9    57.5
ρ <sub>polpa</sub> (t/m³)	2.87	1.92	1.92	2.12    1.64
P <sub>80</sub> (mm)	10.34	1.75	0.49	0.59    0.21

# ANEXO 3: Dados do Ajuste do Modelo (pág1/2)

DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS EXPERIMENTAIS

Malha (mm)	% Passante acum.				
	Alim. Nova	Alim. Moinho	Desc. Moinho	Classificador	
				U/F	O/F
25.40	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
19.05	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
12.70	93.4	98.1	100.0	100.0	100.0
9.53	73.0	92.2	100.0	100.0	100.0
6.35	58.4	88.0	100.0	100.0	100.0
3.18	44.7	84.0	99.9	99.9	100.0
2.36	39.4	82.2	99.6	99.5	100.0
1.70	34.3	79.7	98.7	98.1	100.0
1.18	29.4	76.2	96.6	95.2	100.0
0.850	25.1	71.6	93.2	90.5	100.0
0.600	20.4	63.2	86.0	80.6	99.5
0.425	16.4	52.1	75.4	66.6	97.2
0.300	13.1	39.6	62.1	50.4	91.0
0.212	10.7	29.3	49.5	36.8	80.9
0.150	8.8	22.0	39.5	27.4	69.5
0.106	7.4	17.4	32.3	21.4	59.1
0.075	6.5	14.5	27.5	17.8	51.3
0.053	5.5	12.1	23.0	14.8	43.1
0.038	4.9	10.6	20.0	12.9	37.6
0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS CALCULADAS

Malha (mm)	% Passante acum.				
	Alim. Nova	Alim. Moinho	Desc. Moinho	Classificador	
				U/F	O/F
25.40	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
19.05	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
12.70	93.4	98.2	100.0	100.0	100.0
9.53	73.2	92.8	100.0	100.0	100.0
6.35	58.4	88.6	100.0	99.9	100.0
3.18	44.7	84.6	99.7	99.6	100.0
2.36	39.4	82.8	99.4	99.2	100.0
1.70	34.3	80.7	98.7	98.2	100.0
1.18	29.4	77.5	96.8	95.6	100.0
0.850	25.1	72.6	93.2	90.6	100.0
0.600	20.4	63.8	85.5	80.2	99.6
0.425	16.4	51.4	73.5	64.6	97.1
0.300	13.1	38.6	59.8	48.2	90.3
0.212	10.7	28.9	48.0	35.8	80.3
0.150	8.8	22.2	38.9	27.3	69.7
0.106	7.4	17.6	32.0	21.5	59.9
0.075	6.5	14.4	26.8	17.4	51.4
0.053	5.5	11.9	22.5	14.3	43.9
0.038	4.9	10.1	19.1	12.0	37.9
0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Q <sub>sol</sub> (t/h)	Alim. Nova	Alim. Moinho	Desc. Moinho	Classificador	
				U/F	O/F
	0.425	1.475	1.475	1.050	0.425
Q <sub>água</sub> (t/h)	0.017	0.611	0.611	0.298	0.314
Q <sub>polpa</sub> (t/h)	0.442	2.086	2.086	1.348	0.739
% sol	96.2	70.7	70.7	77.9	57.5
ρ <sub>polpa</sub> (t/m³)	2.87	1.92	1.92	2.12	1.64
P <sub>80</sub> (mm)	10.33	1.75	0.49	0.59	0.21

Q <sub>sol</sub> (t/h)	Alim. Nova	Alim. Moinho	Desc. Moinho	Classificador	
				U/F	O/F
	0.425	1.551	1.551	1.125	0.426
Q <sub>água</sub> (t/h)	0.017	0.643	0.643	0.284	0.359
Q <sub>polpa</sub> (t/h)	0.442	2.194	2.194	1.409	0.785
% sol	96.2	70.7	70.7	79.8	54.3
ρ <sub>polpa</sub> (t/m³)	2.87	1.92	1.92	2.18	1.58
P <sub>80</sub> (mm)	10.32	1.57	0.51	0.60	0.21



## ANEXO 3: Dados do Ajuste do Modelo (pág 2/2)

Parâmetro R/D*			
Nó	Tamanho	Ln R/D* (meas)	Ln R/D* (calc)
1	0.075	-0.541	-0.478
2	0.212	-0.286	-0.361
3	1.7	2.845	2.899
4	12.7	8.603	8.065

### Ciclones

Parameter	Value
Sharpness of Efficiency Curve - Alpha	1.39
Initial Dip in Efficiency Curve - Beta	0
Water Split to Fine Product (%)	55.78
Corrected D50 - d50c (mm)	0.215
Calculated Value - Beta*	1

### Água nova

Required % Solids (%)	70.7
New Liquid Addition (t/h)	0.342
Solids Flow (t/h)	1.551
Liq Flow (t/h)	0.643
% Solids (%)	70.7
Volume (m3/h)	1.143

Dados Energéticos	
Feed Cone Angle (Flat = 0)	0
Discharge Cone Angle (Flat = 0)	0
Trunion Diameter	1.655
Critical Speed Fraction	0.7
Ball Volume (%)	35
Total Filling Of Cyl Sec (%)	35
Void Filling Fraction	1
Ball SG	7.8
Ore SG	3.1
Liquid SG	1
Discharge Slurry %Solids (%)	70.7
Calibration Constant	1.26
Charge Density	5.448
Estimated No Load Power (kW)	1.227
Total Power (Grate) (kW)	8.952
Total Power (Overflow) (kW)	7.82

ANEXO 4: Dados da Simulação do Moinho (pág. 1/2)

DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS EXPERIMENTAIS

Malha (mm)	% Passante acum.				
	Alim. Nova	Alim. Moinho	Desc. Moinho	Classificador	
				U/F	O/F
25.40	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
19.05	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
12.70	93.4	98.1	100.0	100.0	100.0
9.53	73.0	92.2	100.0	100.0	100.0
6.35	58.4	88.0	100.0	100.0	100.0
3.18	44.7	84.0	99.9	99.9	100.0
2.36	39.4	82.2	99.6	99.5	100.0
1.70	34.3	79.7	98.7	98.1	100.0
1.18	29.4	76.2	96.6	95.2	100.0
0.850	25.1	71.6	93.2	90.5	100.0
0.600	20.4	63.2	86.0	80.6	99.5
0.425	16.4	52.1	75.4	66.6	97.2
0.300	13.1	39.6	62.1	50.4	91.0
0.212	10.7	29.3	49.5	36.8	80.9
0.150	8.8	22.0	39.5	27.4	69.5
0.106	7.4	17.4	32.3	21.4	59.1
0.075	6.5	14.5	27.5	17.8	51.3
0.053	5.5	12.1	23.0	14.8	43.1
0.038	4.9	10.6	20.0	12.9	37.6
0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

DISTRIBUIÇÕES GRANULOMÉTRICAS CALCULADAS

Malha (mm)	% Passante acum.				
	Alim. Nova	Alim. Moinho	Desc. Moinho	Classificador	
				U/F	O/F
25.40	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
19.05	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
12.70	93.4	98.2	100.0	100.0	100.0
9.53	73.2	92.7	100.0	100.0	100.0
6.35	58.4	88.4	100.0	99.9	100.0
3.18	44.7	84.4	99.8	99.7	100.0
2.36	39.4	82.7	99.4	99.2	100.0
1.70	34.3	80.5	98.7	98.2	100.0
1.18	29.4	77.3	96.9	95.7	100.0
0.850	25.1	72.5	93.3	90.7	100.0
0.600	20.4	63.9	85.8	80.5	99.6
0.425	16.4	51.6	74.0	65.1	97.1
0.300	13.1	38.9	60.4	48.8	90.5
0.212	10.7	29.2	48.6	36.3	80.6
0.150	8.8	22.5	39.5	27.8	70.1
0.106	7.4	17.9	32.6	21.9	60.3
0.075	6.5	14.7	27.2	17.8	51.8
0.053	5.5	12.1	22.9	14.7	44.3
0.038	4.9	10.3	19.5	12.3	38.3
0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Q <sub>sol</sub> (t/h)	Alim. Nova	Alim. Moinho	Desc. Moinho	Classificador	
				U/F	O/F
	0.425	1.475	1.475	1.050	0.425
Q <sub>água</sub> (t/h)	0.017	0.611	0.611	0.298	0.314
Q <sub>polpa</sub> (t/h)	0.442	2.086	2.086	1.348	0.739
% sol	96.2	70.7	70.7	77.9	57.5
ρ <sub>polpa</sub> (t/m³)	2.87	1.92	1.92	2.12	1.64
P <sub>80</sub> (mm)	10.33	1.75	0.49	0.59	0.21

Q <sub>sol</sub> (t/h)	Alim. Nova	Alim. Moinho	Desc. Moinho	Classificador	
				U/F	O/F
	254.0	916.7	916.7	662.7	254.0
Q <sub>água</sub> (t/h)	10.0	379.9	379.9	168.0	211.9
Q <sub>polpa</sub> (t/h)	264.0	1296.6	1296.6	830.7	465.9
% sol	96.2	70.7	70.7	79.8	54.5
ρ <sub>polpa</sub> (t/m³)	2.87	1.92	1.92	2.18	1.59
P <sub>80</sub> (mm)	10.32	1.60	0.50	0.59	0.21

## ANEXO 4: Dados da Simulação do Moinho (pág. 2/2)

Parâmetro R/D*			
Nó	Tamanho	Ln R/D* (meas)	Ln R/D* (calc)
1	0.075	-0.478	0.442
2	0.212	-0.361	0.559
3	1.7	2.899	3.82
4	12.7	8.065	8.986

### Ciclones

Parameter	Value
Sharpness of Efficiency Curve - Alpha	1.39
Initial Dip in Efficiency Curve - Beta	0
Water Split to Fine Product (%)	55.78
Corrected D50 - d50c (mm)	0.215
Calculated Value - Beta*	1

### Água nova

Required % Solids (%)	70.7
New Liquid Addition (t/h)	201.9
Solids Flow (t/h)	916.7
Liq Flow (t/h)	379.9
% Solids (%)	70.7
Volume (m3/h)	675.6

Dados Energéticos	
Feed Cone Angle (Flat = 0)	0
Discharge Cone Angle (Flat = 0)	0
Trunion Diameter	1.655
Critical Speed Fraction	0.7
Ball Volume (%)	35
Total Filling Of Cyl Sec (%)	35
Void Filling Fraction	1
Ball SG	7.8
Ore SG	3.1
Liquid SG	1
Discharge Slurry %Solids (%)	70.7
Calibration Constant	1.26
Charge Density	5.448
Estimated No Load Power (kW)	235.4
Total Power (Grate) (kW)	4936
Total Power (Overflow) (kW)	4247

### Moinho de bolas

	Simulado	Original
Dint (m):	5.761	0.914
Lint (m):	7.437	
%Vc:	0.7	0.7
GE:	0.35	0.35
WI:	17.8	17.8
Top size (mm):	50	50

# ANEXO 5: Dados da Simulação do Ciclone (1/2)

Simulação Ciclone + Moínho

Simulação do Ciclone

Equipamento	Fluxo	Solids (t/h)	Solids (t/h)	% Solids	% Solids
		Experimental	Simulado	Exp.	Sim.
Classificador	Alim.	1.475	916.7	70.7	60
Classificador	U/F	662.7	681.8	70	71.59
Classificador	O/F	254	234.9	70	40.82

Equipamento	Fluxo	Solids (t/h)	Solids (t/h)	% Solids	% Solids
		Exp	Sim	Exp	Sim
Moínho de Bolas	Prod	1.475	621.5	70.7	70.7
Classificador	U/F	662.7	367.5	70	75.62
Classificador	O/F	254	254	70	46.19
Alimentação	Combiner	254	254	96.2	96.2

Malha (mm)	% Passante acum.					
	DG - Experimental			DG - Simulada		
	Alim.	U/F	O/F	Alim.	U/F	O/F
25.40	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
19.05	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
12.70	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
9.53	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
6.35	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
3.18	99.9	99.9	100.0	99.9	99.7	100.0
2.36	99.6	99.5	100.0	99.6	99.3	100.0
1.70	98.7	98.1	100.0	98.7	98.3	100.0
1.18	96.6	95.2	100.0	96.6	95.8	100.0
0.850	93.2	90.5	100.0	93.2	91.0	100.0
0.600	86.0	80.6	99.5	86.0	80.9	99.9
0.425	75.4	66.6	97.2	75.4	65.4	98.9
0.300	62.1	50.4	91.0	62.1	48.6	94.6
0.212	49.5	36.8	80.9	49.5	35.7	86.1
0.150	39.5	27.4	69.5	39.5	27.1	75.6
0.106	32.3	21.4	59.1	32.3	21.3	65.3
0.075	27.5	17.8	51.3	27.5	17.3	56.1
0.053	23.0	14.8	43.1	23.0	14.2	48.0
0.038	20.0	12.9	37.6	20.0	12.0	41.4
0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Malha (mm)	% Passante acum.					
	DG - Experimental			DG - Simulada		
	Alim.	U/F	O/F	Alim.	U/F	O/F
25.40	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
19.05	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
12.70	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
9.53	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
6.35	100.0	100.0	100.0	100.0	99.9	100.0
3.18	99.9	99.9	100.0	99.8	99.6	100.0
2.36	99.6	99.5	100.0	99.4	99.1	100.0
1.70	98.7	98.1	100.0	98.7	97.8	100.0
1.18	96.6	95.2	100.0	96.9	94.7	100.0
0.850	93.2	90.5	100.0	93.3	88.7	100.0
0.600	86.0	80.6	99.5	85.9	76.5	99.4
0.425	75.4	66.6	97.2	74.5	59.3	96.4
0.300	62.1	50.4	91.0	61.9	43.1	89.0
0.212	49.5	36.8	80.9	51.0	31.8	78.8
0.150	39.5	27.4	69.5	42.3	24.3	68.4
0.106	32.3	21.4	59.1	35.5	19.3	58.9
0.075	27.5	17.8	51.3	30.1	15.7	50.7
0.053	23.0	14.8	43.1	25.5	13.0	43.6
0.038	20.0	12.9	37.6	22.0	11.0	37.8
0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0



## ANEXO 5: Dados da Simulação do Ciclone (2/2)

Parametro	Simulação ciclone	Simulação ciclone + moinho
Diâmetro do Ciclone - Dc (m)	0.66	0.66
Diâmetro do Orifício de Entrada - Di (m)	0.192	0.192
Diâmetro Vortex Finder - Do (m)	0.203	0.304
Diâmetro Apex - Du (m)	0.154	0.152
Comprimento cilíndrico - Lc (m)	0.7	0.55
Ângulo do Cone - Theta (deg)	13	20
Número de Ciclones	3	4
Partição de água para o O/F (%)	55.72	71.41
D50 corrigido, mm (Total)	0.191	0.273
Pressão de Operação, kPa	55.18	31.26

# ANEXO 6: Dados do Dimensionamento por Bond

## MODELO DE BOND

### DIMENSIONAMENTO

#### Características

Arraço de descarga: Diafragma

Processo: via úmida

Circuito: fechado

L/D: 1-1,5:1

Vol. de carga: 35%

Vel: 70% de Vc

WI de laboratório: 17,8 kWh/t

Peso específico: 3,1

#### Cálculo da potência

$$W = \frac{10 \cdot WI}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10 \cdot WI}{\sqrt{F_{80}}}$$

Tamanho equivalente a 80% pass. no produto do moinho

P<sub>80</sub>: (micra).

F<sub>80</sub>: Tamanho equivalente a 80% pass. na alimentação do moinho (micra).

W: Consumo de potência (kWh/t curtas)

para passar p/ t métrica multiplicar por: 1.102

#### Fatores de correção

##### EF1 - Fator de moagem por via seca

Moagem via úmida

$$EF1 = 1$$

##### EF2 - Fator de circuito aberto em moinhos de bolas

Circuito fechado

$$EF2 = 1$$

##### EF3 - Fator de diâmetro (aplicado qdo o diâm. Interno é < 8 pés)

Diâm. Interno > 8 pés

$$EF3 = 1$$

##### EF4 - Fator de alimentação com tamanho excessivo

$$Fo = \sqrt{\frac{13}{WI}} \times 4000 (\mu m)$$
$$EF4 = \frac{Rr + (WI - 7) \cdot (F - Fo) / Fo}{Rr}$$

Rr = relação de redução

$$Rr = F/P$$

$$F = 10.33 \text{ mm}$$

$$P = 0.21 \text{ mm}$$

$$Rr = 49.2$$

$$WI = 17.8 \text{ kWh/t}$$

$$Fo = 3418.39 \mu m$$

$$F - Fo / Fo = 2.02189$$

$$1.44391$$

$$EF4 = 5$$

**EF5 - Fator de finura para moinhos de bolas (p/ produtos mais finos q 80% pass. em 200 mesh)**

Produtos 80% passante em 0,51 mm  
EF5 = 1

**EF6 - Fator de taxa de redução - moinho de barras**

moinho de bolas  
EF6 = 1

**EF7 - Fator de taxa de redução - moinho de bolas (qdo Rr < 6:1)**

Rr = 8,3:1  
EF7 = 1

**EF8 - Fator de eficiência para moinhos de barras**

Moinho de bolas  
EF8 = 1

**Potência corrigida**

			101.636
F80 =	10330	μm	6
			14.4913
P80 =	210	μm	8
WI =	17.8	kWh/t	
	W =	10.5	kWh/t
	W =	10.5	kWh/t métrica
	W <sub>corr</sub> =	15.2	kWh/t métrica
	Vazão =	254	t/h

<b>Pot = 3863 kW</b>
<b>Pot = 5178 hp</b>

1hp = 0.746 kW
----------------

**Escolha do moinho**

GE: 35%

Descarga: Diafragma

Moinho inicial: 18' x 18' Pot<sub>esc</sub> = 3077 hp

%Vc: 67.5

Dint: 17.4 ft

L/D: 1/1

1 ft = 0.3048 m

Moinho escolhido:

$$L_{\text{corrigido}} = \frac{Pot_{\text{corrigida}}}{Pot_{\text{tabelada}}} * L_{\text{tabelado}}$$

5.30352

9.23209

9 8.96112

Lcorr = 30 ft

**Moinho escolhido: 18' x 30' (5,3 x 9,2 m)**

**L/D: 1.7**

**Pot = 5178 hp**

## ANEXO 6.1: Dados da Simulação do Moinho 18' x 30'

Parâmetro R/D*			
Nó	Tamanho	Ln R/D* (meas)	Ln R/D* (calc)
1	0.075	-0.478	0.401
2	0.212	-0.361	0.518
3	1.7	2.899	3.779
4	12.7	8.065	8.944

### Ciclones

Parameter	Value
Sharpness of Efficiency Curve - Alpha	1.39
Initial Dip in Efficiency Curve - Beta	0
Water Split to Fine Product (%)	55.78
Corrected D50 - d50c (mm)	0.215
Calculated Value - Beta*	1

### Água nova

Required % Solids (%)	70.7
New Liquid Addition (t/h)	201.9
Solids Flow (t/h)	916.7
Liq Flow (t/h)	379.9
% Solids (%)	70.7
Volume (m3/h)	675.6

### Dados Energéticos

Feed Cone Angle (Flat = 0)	0
Discharge Cone Angle (Flat = 0)	0
Trunion Diameter	1.655
Critical Speed Fraction	0.7
Ball Volume (%)	35
Total Filling Of Cyl Sec (%)	35
Void Filling Fraction	1
Ball SG	7.8
Ore SG	3.1
Liquid SG	1
Discharge Slurry %Solids (%)	70.7
Calibration Constant	1.26
Charge Density	5.448
Estimated No Load Power (kW)	231.5
Total Power (Grate) (kW)	4838
Total Power (Overflow) (kW)	4163

### Moinho de bolas

	Simulado	Original
Dint (m):	5.304	0.914
Lint (m):	8.961	
%Vc:	0.7	0.7
GE:	0.35	0.35
Wt:	17.8	17.8
Top size (mm):	5.304	50

# ANEXO 7: PROGRAMA DE AMOSTRAGEM

## 1. Procedimentos para a Amostragem

- Equipe envolvida: um supervisor e dois operadores
- Período de amostragem – 3 horas com incrementos de 30' – Total de 7 incrementos
- Pontos de amostragem (9) para amostras de polpa:
  - Descarga do moinho (2)
  - Overflow do circuito (2)
  - Underflow* do ciclone (2)
  - Rejeito da gravimetria (2)
  - Overflow combinado (1)
- Amostra da alimentação de cada circuito (2) – retirada da correia ou incremental
- Preparar baldes (9), etiquetas, amostradores de fluxo, etc.
- Pesar previamente e após as amostragens todos os baldes,

## 2. Tratamento das Amostras – Equipe da MMV

- Polpa – determinação de granulometria e porcentagem de sólidos
- Alimentação - determinação de granulometria e umidade
- Remessa de amostra, para a USP, com 30 kg para determinação de WI

## 3. Informações Necessárias para o Período de Amostragem – Para cada Circuito

- Vazão de alimentação do circuito – intervalos de 1'
- Número de ciclones em operação
- Pressão de operação dos ciclones
- Vazão de polpa na alimentação dos ciclones – intervalos de 1'
- Densidade de polpa na alimentação dos ciclones – intervalos de 1'
- Vazões parciais e totais de água adicionada no circuito
- Potência de operação do moinho

## 4. Informações Necessárias Após o Período de Amostragem

- Minério alimentado – identificação / pilha / tipo / características
- Fabricantes dos moinhos e ciclones
- Grau de enchimento dos moinhos
- Rotação dos moinhos
- Tamanho de bolas
- Frequência de adição de bolas
- Tipo de revestimentos
- Dimensões nominais e internas dos moinhos
- Dimensões dos ciclones (diâmetro, aberturas de apex e vortex, altura da parte cilíndrica, área da abertura de entrada)
- Modelo das bombas de polpa e potência dos motores

## ANEXO 8: Dados coletados durante a amostragem (pág 1/2)

Peneira (TYLER) / Malha (mm)		Porcentagem Passante Acumulada (%)							
#	(mm)	LINHA 1A				LINHA 1B			
		Alim. Nova	Desc.Moinho	UF	OF	Alim. Nova	Desc.Moinho	UF	OF
	25.000	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%	100.00%
	12.700	95.36%	100.00%	100.00%	100.00%	96.31%	100.00%	100.00%	100.00%
	9.520	82.43%	100.00%	100.00%	100.00%	86.79%	100.00%	100.00%	100.00%
	6.350	56.92%	100.00%	99.91%	100.00%	64.12%	99.95%	99.85%	100.00%
6 #	3.360	35.25%	99.72%	99.36%	100.00%	42.03%	99.49%	99.42%	100.00%
10 #	1.700	24.16%	98.51%	97.32%	100.00%	29.21%	98.25%	97.84%	100.00%
16 #	1.000	19.61%	96.00%	93.83%	100.00%	23.34%	95.78%	94.86%	100.00%
20 #	0.850	18.47%	94.42%	91.91%	100.00%	21.79%	94.32%	93.10%	100.00%
28 #	0.600	17.04%	90.74%	87.41%	100.00%	19.82%	91.14%	89.43%	100.00%
48 #	0.300	14.43%	72.62%	65.75%	100.00%	16.21%	75.87%	70.65%	100.00%
65 #	0.212	13.51%	60.27%	51.10%	99.81%	15.05%	63.07%	56.23%	99.82%
100 #	0.150	12.58%	42.91%	31.75%	96.31%	13.90%	44.95%	36.07%	98.15%
150 #	0.106	11.69%	31.56%	20.09%	87.07%	12.84%	32.38%	23.45%	91.28%
200 #	0.075	10.61%	23.11%	11.22%	75.92%	11.61%	21.36%	12.61%	81.00%
270 #	0.053	9.83%	18.38%	7.29%	67.88%	10.64%	15.10%	7.47%	72.17%
400 #	0.038	8.23%	12.78%	3.97%	51.87%	8.73%	8.57%	3.89%	56.18%
< 400 #	0.038	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Linha	Fluxo	Cw	Qpp (m3/h)	Qpp (t/h)	Qag (m3/h)	Qsol (t/h)
A	Desc. Moinho	72.5	105.0	203.4	55.8	147.5
	Alim. Cicl.	43.0	244.7	343.1	195.6	147.5
	UF	82.8	55.4	126.3	21.7	104.6
	OF	19.8	189.2	216.9	173.9	43.0
B	Desc. Moinho	75.8	87.1	176.3	42.6	133.7
	Alim. Cicl.	43.0	221.8	310.8	177.2	133.7
	UF	84.0	46.1	107.0	17.1	89.9
	OF	21.5	175.7	203.9	160.1	43.7

## ANEXO 8: Dados coletados durante a amostragem (pág 2/2)

Densidade de Polpa							
Linha		Incremento					Média
		1	2	3	4	5	
	Horário	14:50	15:20	15:50	16:20	16:50	
A	Desc. Moinho	1.93		1.93		1.95	1.94
	UF	2.30	2.32	2.26	2.21	2.30	2.28
	OF	1.14	1.16	1.14	1.14	1.15	1.15
B	Desc. Moinho	2.02	2.02	2.03		2.02	2.02
	UF	2.33	2.31	2.34	2.31	2.32	2.32
	OF	1.14	1.17	1.16	1.17	1.16	1.16

Linha	Fluxo	Densidade da Polpa	Peso Específico Sólidos	Porcentagem de Sólidos
A	Desc. Moinho	1.94	3.0	72.5
	UF	2.28	3.1	82.8
	OF	1.15	2.8	19.8
B	Desc. Moinho	2.02	3.0	75.8
	UF	2.32	3.1	84.0
	OF	1.16	2.8	21.5

Linha	Fluxo	Cw	Rp	Rs	Rw	CC
A	UF	82.8	-	-	-	-
	OF	19.8	-	-	-	-
	Alim.Cic. (est)	43	36.8	70.9	11.1	243
	Alim.Cic. (est)	44	38.4	72.2	11.8	260
B	UF	84.0	-	-	-	-
	OF	21.5	-	-	-	-
	Alim.Cic. (est)	43	34.4	67.3	9.6	206
	Alim.Cic. (est)	44	36.0	68.8	10.3	221

Vazão de Alimentação do Circuito					Potência Consumida pelos Moinhos			
Linha	Horário	Leitura	Média		Horário	Leitura	Média	
			Parcial	Global			Parcial	Global
A	15:12	6590.80	-		15:21	22704369	-	
	16:08	6633.17	45.40	45.24	16:10	22704826	560	559
	17:16	6684.29	45.11		17:18	22705460	559	
B	15:13	247113.74	-		15:22	85324	-	
	16:09	247156.80	46.14	46.04	16:11	85767	542	543
	17:17	247208.88	45.95		17:19	86383	544	



## ANEXO 9: Dados obtidos no balanço de massa do circuito de moagem

Malha (mm)	% Passante acum. - LINHA A							
	Experimental				Calculada			
	Alim. Nova	Desc. Moinho	Classificador		Alim. Nova	Desc. Moinho	Classificador	
			U/F	O/F			U/F	O/F
25.000	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
12.700	95.4	100.0	100.0	100.0	95.4	100.0	100.0	100.0
9.520	82.4	100.0	100.0	100.0	82.4	100.0	100.0	100.0
6.350	56.9	100.0	99.9	100.0	56.9	100.0	100.0	100.0
3.360	35.3	99.7	99.4	100.0	35.3	99.6	99.5	100.0
1.700	24.2	98.5	97.3	100.0	24.2	98.2	97.7	100.0
1.000	19.6	96.0	93.8	100.0	19.6	95.6	94.4	100.0
0.850	18.5	94.4	91.9	100.0	18.5	94.1	92.4	100.0
0.600	17.0	90.7	87.4	100.0	17.0	90.6	87.8	100.0
0.300	14.4	72.6	65.8	100.0	14.4	73.4	65.6	100.0
0.212	13.5	60.3	51.1	99.8	13.5	61.8	50.5	99.8
0.150	12.6	42.9	31.8	96.3	12.6	45.5	30.5	96.2
0.106	11.7	31.6	20.1	87.1	11.7	34.4	18.9	86.8
0.075	10.6	23.1	11.2	75.9	10.6	25.4	10.6	75.6
0.053	9.8	18.4	7.3	67.9	9.8	20.6	6.7	67.5
0.038	8.2	12.8	4.0	51.9	8.2	14.5	3.6	51.6
0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Malha (mm)	% Passante acum. - LINHA B							
	Experimental				Calculada			
	Alim. Nova	Desc. Moinho	Classificador		Alim. Nova	Desc. Moinho	Classificador	
			U/F	O/F			U/F	O/F
25.000	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
12.700	96.3	100.0	100.0	100.0	96.3	100.0	100.0	100.0
9.520	86.8	100.0	100.0	100.0	86.8	100.0	100.0	100.0
6.350	64.1	100.0	99.9	100.0	64.1	99.9	99.9	100.0
3.360	42.0	99.5	99.4	100.0	42.0	99.5	99.4	100.0
1.700	29.2	98.3	97.8	100.0	29.2	98.3	97.9	100.0
1.000	23.3	95.8	94.9	100.0	23.3	95.8	94.9	100.0
0.850	21.8	94.3	93.1	100.0	21.8	94.4	93.2	100.0
0.600	19.8	91.1	89.4	100.0	19.8	91.3	89.5	100.0
0.300	16.2	75.9	70.7	100.0	16.2	76.0	71.0	100.0
0.212	15.1	63.1	56.2	99.8	15.1	63.8	56.3	99.8
0.150	13.9	45.0	36.1	98.2	13.9	46.6	35.7	98.1
0.106	12.8	32.4	23.5	91.3	12.8	34.7	22.8	91.2
0.075	11.6	21.4	12.6	81.0	11.6	23.9	12.0	80.8
0.053	10.6	15.1	7.5	72.2	10.6	18.0	6.8	71.8
0.038	8.7	8.6	3.9	56.2	8.7	12.2	3.1	55.6
0.038	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fluxos	Linha A				Linha B			
	Solids (t/h)	Solids (t/h)	% Solids	% Solids	Solids (t/h)	Solids (t/h)	% Solids	% Solids
	Exp	Bal	Exp	Bal	Exp	Bal	Exp	Bal
Alim. Nova	43	30.99	95	95	43.7	19	95	95
Prod. Moinho	147.5	135.9	72.5	72.5	133.7	109.4	75.8	75.8
Ciclone U/F	104.6	104.9	82.8	82.8	89.9	90.39	84	84
Ciclone O/F	43	30.99	19.8	19.8	43.7	19	21.5	21.5



# ANEXO 10: Dados obtidos no Ajuste dos Modelos

(pág. 1/2)

Malha (mm)	% Passante acum. - LINHA A							
	Experimental				Calculada			
	Alim. Nova	Desc. Moinho	Classificador		Alim. Nova	Desc. Moinho	Classificador	
			U/F	O/F			U/F	O/F
25.000	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
12.700	95.4	100.0	100.0	100.0	95.4	100.0	100.0	100.0
9.520	82.4	100.0	100.0	100.0	82.4	100.0	100.0	100.0
6.350	56.9	100.0	99.9	100.0	56.9	99.9	99.9	100.0
3.360	35.3	99.7	99.4	100.0	35.2	99.6	99.5	100.0
1.700	24.2	98.5	97.3	100.0	24.2	98.4	97.8	100.0
1.000	19.6	96.0	93.8	100.0	19.6	95.8	94.1	100.0
0.850	18.5	94.4	91.9	100.0	18.5	94.5	92.2	100.0
0.600	17.0	90.7	87.4	100.0	17.0	90.6	86.7	100.0
0.300	14.4	72.6	65.8	100.0	14.4	75.6	65.6	100.0
0.212	13.5	60.3	51.1	99.8	13.5	63.1	48.2	99.5
0.150	12.6	42.9	31.8	96.3	12.6	48.4	29.1	95.8
0.106	11.7	31.6	20.1	87.1	11.7	36.5	16.1	86.7
0.075	10.6	23.1	11.2	75.9	10.6	28.4	9.4	75.0
0.053	9.8	18.4	7.3	67.9	9.8	22.8	6.1	63.5
0.038	8.2	12.8	4.0	51.9	8.2	18.4	4.3	52.9
0.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Malha (mm)	% Passante acum. - LINHA B							
	Experimental				Calculada			
	Alim. Nova	Desc. Moinho	Classificador		Alim. Nova	Desc. Moinho	Classificador	
			U/F	O/F			U/F	O/F
25.000	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
12.700	96.3	100.0	100.0	100.0	96.3	100.0	100.0	100.0
9.520	86.8	100.0	100.0	100.0	86.8	100.0	100.0	100.0
6.350	64.1	100.0	99.9	100.0	64.1	100.0	99.9	100.0
3.360	42.0	99.5	99.4	100.0	42.5	99.6	99.4	100.0
1.700	29.2	98.3	97.8	100.0	29.5	98.4	97.7	100.0
1.000	23.3	95.8	94.9	100.0	23.5	96.1	94.3	100.0
0.850	21.8	94.3	93.1	100.0	22.0	95.0	92.7	100.0
0.600	19.8	91.1	89.4	100.0	19.8	91.9	88.2	100.0
0.300	16.2	75.9	70.7	100.0	16.3	80.4	71.3	100.0
0.212	15.1	63.1	56.2	99.8	15.1	70.8	57.3	99.8
0.150	13.9	45.0	36.1	98.2	13.9	58.3	39.8	98.1
0.106	12.8	32.4	23.5	91.3	12.8	45.5	23.8	92.3
0.075	11.6	21.4	12.6	81.0	11.6	35.2	13.4	82.3
0.053	10.6	15.1	7.5	72.2	10.5	27.6	7.7	70.7
0.038	8.7	8.6	3.9	56.2	8.7	21.9	4.6	59.4
0.038	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fluxos	Linha A				Linha B			
	Solids (t/h)	Solids (t/h)	% Solids	% Solids	Solids (t/h)	Solids (t/h)	% Solids	% Solids
	Exp	Fit	Exp	Fit	Exp	Fit	Exp	Fit
Alim.Nova	43	43	95	95	43.7	43.7	95	95
Prod. Moinho	147.5	148.4	72.5	72.6	133.7	138.5	75.8	61.23
Ciclone U/F	104.6	105.4	82.8	82.91	89.9	94.78	84	90.8
Ciclone O/F	43	43	19.8	19.79	43.7	43.7	21.5	17.05

## ANEXO 10: Dados obtidos no Ajuste dos Modelos

(pág. 2/2)

Parâmetro R/D* - Linha A			
Nó	Tamanho	Ln R/D* (meas)	Ln R/D* (calc)
1	0.2	1.194	1.195
2	1.5	3.723	3.723
3	15	8.868	8.868
4	0	0	0

Parâmetro R/D* - Linha B			
Nó	Tamanho	Ln R/D* (meas)	Ln R/D* (calc)
1	0.2	1.802	1.802
2	1.5	4.144	4.145
3	15	10.98	10.98
4	5	6.16	6.161

### Ciclones

Parameter – Linha A	Value
D50 Constant - KD0	7.55E-05
Capacity Constant - KQ0	437.6
Volume Split Constant - KV1	3.309
Water Split Constant - KW1	3.892
Sharpness of Efficiency Curve - Alpha	2.127
Initial Dip in Efficiency Curve - Beta	0
Calculated Value - Beta*	1

Parameter – Linha B	Value
D50 Constant - KD0	7.18E-05
Capacity Constant - KQ0	421.2
Volume Split Constant - KV1	2.372
Water Split Constant - KW1	1.83
Sharpness of Efficiency Curve - Alpha	1.592
Initial Dip in Efficiency Curve - Beta	0
Calculated Value - Beta*	1

Dados Energéticos – Linha A	
Feed Cone Angle (Flat = 0)	0
Discharge Cone Angle (Flat = 0)	0
Trunion Diameter	1.655
Critical Speed Fraction	0.727
Ball Volume (%)	32
Total Filling Of Cyl Sec (%)	32
Void Filling Fraction	1
Ball SG	7.8
Ore SG	3
Liquid SG	1
Discharge Slurry %Solids (%)	72.6
Calibration Constant	1.26
Charge Density	5.455
Estimated No Load Power (kW)	42.91
Total Power (Grate) (kW)	611.1
Total Power (Overflow) (kW)	520.5

Dados Energéticos – Linha B	
Feed Cone Angle (Flat = 0)	0
Discharge Cone Angle (Flat = 0)	0
Trunion Diameter	1.655
Critical Speed Fraction	0.727
Ball Volume (%)	32
Total Filling Of Cyl Sec (%)	32
Void Filling Fraction	1
Ball SG	7.8
Ore SG	3
Liquid SG	1
Discharge Slurry %Solids (%)	61.23
Calibration Constant	1.26
Charge Density	5.356
Estimated No Load Power (kW)	42.91
Total Power (Grate) (kW)	600.7
Total Power (Overflow) (kW)	521.8

## ANEXO 11: Estimativa WI operacional

Vazão de Alimentação do Circuito				
Linha	Horário	Leitura	Média	
			Parcial	Global
A	15:12	6590.80	-	45.24
	16:08	6633.17	45.40	
	17:16	6684.29	45.11	
Potência Consumida pelos Moinhos				
A	15:21	22704369	-	559
	16:10	22704826	560	
	17:18	22705460	559	

Energia Específica (kWh/t)	BWI Op Estimado (kWh/t)
12.4	<b>12.7</b>

### Fatores de correção

#### EF1 - Fator de moagem por via seca

Moagem via úmida

$$EF1 = 1$$

#### EF2 - Fator de circuito aberto em moinhos de bolas

Circuito fechado

$$EF2 = 1$$

#### EF3 - Fator de diâmetro (aplicado qdo o diâm. Interno é < 8 pés)

Diâm. Interno > 8 pés

$$EF3 = 1$$

#### EF4 - Fator de alimentação com tamanho excessivo

$$Fo = \sqrt{\frac{13}{WI}} \times 4000 (\mu m)$$

$$EF4 = \frac{Rr + (WI - 7) \cdot (F - Fo) / Fo}{Rr}$$

Rr = relação de redução

$$Rr = F/P$$

$$F = 9.12 \text{ mm}$$

$$P = 0.09 \text{ mm}$$

$$Rr = 106.0$$

$$WI = 10.79 \text{ kWh/t}$$

$$Fo = 4390.57 \mu m$$

$$F - Fo / Fo = 1.077179$$

$$EF4 = 1.038497$$

#### EF5 - Fator de finura para moinhos de bolas (p/ produtos mais finos q 80% pass. em 200 mesh)

Produtos 80% passante em 0,086 mm

$$EF5 = 1$$

#### EF6 - Fator de taxa de redução - moinho de barras

moinho de bolas

$$EF6 = 1$$

#### EF7 - Fator de taxa de redução - moinho de bolas (qdo Rr < 6:1)

$$Rr = 106:1$$

$$EF7 = 1$$

#### EF8 - Fator de eficiência para moinhos de barras

Moinho de bolas

$$EF8 = 1$$

$$WI_{oc} = WI_{op} / EF_i = 12,7 / 1,04$$

$$WI_{oc} = \mathbf{12.23 \text{ Kwh/t}}$$

## ANEXO 12: Dimensionamento por Bond

### • Para WI laboratorial

#### Potência corrigida

F80 = 9120  $\mu\text{m}$  95.49869  
 P80 = 86  $\mu\text{m}$  9.273618  
 WI = 10.69 kWh/t  
 W = 10.4 kWh/t  
 W = 10.4 kWh/t métrica  
 W<sub>corr</sub> = 10.8 kWh/t métrica

Vazão = 43 t/h

Pot = 465 kW  
 Pot = 623 hp

1hp = 0.746 kW

#### Escolha do moinho

GE: 35%  
 Descarga: Diafragma  
 Moinho  
 inicial: 11' x 11' Pot<sub>esc</sub> = 610 hp  
 %Vc: 72.8  
 Dint: 10.4 ft  
 L/D: 1/1

$$L_{\text{corrigido}} = \frac{Pot_{\text{corrigida}}}{Pot_{\text{tabelada}}} * L_{\text{tabelado}}$$

Lcorr = 11 ft  
 1 ft = 0.3048 m

Moinho escolhido: 11' x 11' (3,16 x 3,42 m)  
 L/D: 1.1  
 Pot = 623 hp

3.16992  
 3.424345

### • Para WI operacional corrigido

#### Potência corrigida

F80 = 9120  $\mu\text{m}$  95.49869  
 P80 = 86  $\mu\text{m}$  9.273618  
 Wloc = 12.23216 kWh/t  
 W = 11.9 kWh/t  
 W = 11.9 kWh/t métrica  
 W<sub>corr</sub> = 12.4 kWh/t métrica  
 Vazão = 43 t/h

Pot = 532 kW  
 Pot = 713 hp

1hp = 0.746 kW

#### Escolha do moinho

GE: 35%  
 Descarga: Diafragma  
 Moinho  
 inicial: 11,5' x 11' Pot<sub>esc</sub> = 674 hp  
 %Vc: 72.8  
 Dint: 10.9 ft  
 L/D: 1/1

$$L_{\text{corrigido}} = \frac{Pot_{\text{corrigida}}}{Pot_{\text{tabelada}}} * L_{\text{tabelado}}$$

Lcorr = 12 ft  
 1 ft = 0.3048 m

Moinho escolhido: 11,5' x 12' (3,32 x 3,54 m)  
 L/D: 1.1  
 Pot = 713 hp

3.32232  
 3.546278



## ANEXO 13: Resultados dos ajustes para aumento na taxa de alimentação

Equipamento	Fluxo	Sólidos (t/h)		% Sólidos		d <sub>80</sub> (mm)	
		Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
Alimentação	Nova	53	53	95	95	9,12	9,123
Moinho	Alim.	148,4	161,8	72,6	74,2	24,6	3,851
Moinho	Prod	148,4	161,8	72,6	74,2	0,358	0,347
Ciclone	Alim.	148,4	161,8	43	45,19	24,6	0,347
Ciclone	U/F	105,4	108,9	82,91	83,54	0,469	0,476
Ciclone	O/F	43	52,93	19,79	23,24	0,0861	0,0885

Dados Energéticos	Original	Ajustado
Feed Cone Angle (Flat = 0)	0	0
Discharge Cone Angle (Flat = 0)	0	0
Trunion Diameter	1.655	1.655
Critical Speed Fraction	0.727	0.727
Ball Volume (%)	32	32
Total Filling Of Cyl Sec (%)	32	32
Void Filling Fraction	1	1
Ball SG	7.8	7.8
Ore SG	3	3
Liquid SG	1	1
Discharge Slurry %Solids (%)	72.61	74.2
Calibration Constant	1.26	1.26
Charge Density	5.455	5.472
Estimated No Load Power (kW)	42.91	42.91
Total Power (Grate) (kW)	611.1	612.8
Total Power (Overflow) (kW)	520.5	520.3

### Moinho de bolas

	Simulado	Original
Dint (m):	3.27	3.27
Lint (m):	3.7	
%Vc:	0.727	0.727
GE:	0.32	0.32
WI:	10.79	10.79
Top size (mm):	75	90

Parâmetro R/D*			
Nó	Tamanho	Ln R/D* (meas)	Ln R/D* (calc)
1	0.2	1.194	1.377
2	1.5	3.723	3.906
3	15	8.868	8.504

## ANEXO 14: Resultados dos ajustes para minério de maior WI

Resultados do 1º ajuste - redução do diâmetro das bolas

Equipamento	Fluxo	Sólidos (t/h)		% Sólidos		d <sub>80</sub> (mm)	
		Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
Alimentação	Nova	43	43	95	95	9.12	9.123
Moinho	Alim.	148.4	151.3	72.6	73.14	24.6	2.85
Moinho	Prod	148.4	151.3	72.6	73.14	0.358	0.372
Ciclone	Alim.	148.4	151.3	43	43.62	24.6	0.372
Ciclone	U/F	105.4	108.5	82.91	83.61	0.469	0.482
Ciclone	O/F	43	42.84	19.79	19.73	0.0861	0.0898

Resultados do 2º ajuste - redução do diâmetro das bolas + aumento do G.E.

Equipamento	Fluxo	Sólidos (t/h)		% Sólidos		d <sub>80</sub> (mm)	
		Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
Alimentação	Nova	43	43	95	95	9.12	9.123
Moinho	Alim.	148.4	149.5	72.6	72.81	24.6	2.94
Moinho	Prod	148.4	149.5	72.6	72.81	0.358	0.362
Ciclone	Alim.	148.4	149.5	43	43.29	24.6	0.362
Ciclone	U/F	105.4	106.6	82.91	83.18	0.469	0.473
Ciclone	O/F	43	42.95	19.79	19.77	0.0861	0.0879

Dados Energéticos	Original	Ajustado	Ajustado
Feed Cone Angle (Flat = 0)	0	0	0
Discharge Cone Angle (Flat = 0)	0	0	0
Trunion Diameter	1.655	1.655	1.655
Critical Speed Fraction	0.727	0.727	0.727
Ball Volume (%)	32	32	35
Total Filling Of Cyl Sec (%)	32	32	35
Void Filling Fraction	1	1	1
Ball SG	7.8	7.8	7.8
Ore SG	3	3	3
Liquid SG	1	1	1
Discharge Slurry %Solids (%)	72.61	74.2	72.81
Calibration Constant	1.26	1.26	1.26
Charge Density	5.455	5.472	5.457
Estimated No Load Power (kW)	42.91	42.91	42.91
Total Power (Grate) (kW)	611.1	612.8	639.8
Total Power (Overflow) (kW)	520.5	520.3	554.2

Moinho de bolas

	Simulado	Original
Dint (m):	3.27	3.27
Lint (m):	3.7	
%Vc:	0.727	0.727
(2º ajuste) GE:	0.35	0.32
WI:	10.79	10.79
Top size (mm):	75	90

Parâmetro R/D*				
Nó	Tamanho	Ln R/D* (meas)	Ln R/D* (calc1)	Ln R/D* (calc2)
1	0.2	1.194	1.114	1.158
2	1.5	3.723	3.642	3.687
3	15	8.868	8.24	8.284