

DETERMINAÇÃO E UTILIZAÇÃO DAS FUNÇÕES QUEBRA E SELEÇÃO EM MOAGEM DE MINÉRIOS DE FERRO ¹

Klaydison Carlaile Silva ²

Ernandes Sávio de Souza ³

José Cláudio de Figueiredo ⁴

Pablo Jordano Sacramento Mendes ⁵

Resumo

As principais características que os modelos de moagem baseados no método cinético procuram identificar são: taxas de quebra, distribuição granulométrica dos produtos gerados e influências das variáveis de operação nesta distribuição. Este trabalho demonstra como o uso das Funções Quebra e Seleção são importantes ferramentas no estudo de circuitos de moagem existentes e no dimensionamento de moinhos em novos projetos.

Palavras-chave: Moagem; Função; Quebra; Seleção; Modelos; Simulação.

DETERMINATION AND UTILIZATION OF THE SELECTION AND BREAKAGE FUNCTIONS ON THE IRON ORE GRINDING

Abstract

The more important characteristics that the grinding kinetic models try to identify are basically: break rate, particle size distribution and the influence of the operation variables in this distribution. This work demonstrates as Selection and Breakage Functions are important tools in the existent grinding circuits study and in the mills scale up on new projects.

Key words: Grinding; Function; Breakage; Selection; Models; Simulation.

¹ *Contribuição técnica ao VIII Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 18 a 21 de setembro de 2007, Salvador - BA, Brasil.*

² *Engenheiro de Processo, Companhia Vale do Rio Doce*

³ *Engenheiro de Processo, M.Sc., Companhia Vale do Rio Doce*

⁴ *[Engenheiro de Minas], Engenheiro Sênior, Companhia Vale do Rio Doce*

⁵ *Analista de Processo, Companhia Vale do Rio Doce*

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

As operações de moagem constituem etapa dispendiosa do processamento mineral. Segundo Chaves e Peres (1999), “no custo de processamento de minérios de cobre, desde a mina até o embarque do concentrado, esta operação unitária contribui com 40% dos custos totais”. Conforme Beraldo (1987), “os processos de cominuição são altamente consumidores de energia e a eficiência energética da moagem é da ordem de 2% a 3% em relação à produção de área superficial adicional”.

Em relação ao beneficiamento do itabirito, principalmente no estado de Minas Gerais, observa-se a tendência de empobrecimento deste minério e a necessidade cada vez maior da implementação da moagem como forma de obter liberação e adequação granulométrica para concentração via flotação.

Neste contexto, a utilização de modelos matemáticos coerentes para as operações de moagem, contribui de forma inquestionável na redução de custos e no progresso do setor mineral, uma vez que é ferramenta importante na otimização dos circuitos de moagem existentes e no dimensionamento de moinhos em novos projetos.

As “teorias clássicas” de cominuição estabelecem relações entre a energia gasta no processo, a referência granulométrica do produto e a referência granulométrica de alimentação (P_{80} e F_{80} por exemplo).

Os estudos modernos consideram a cinética de fraturamento das partículas e a sua relação entre as variáveis operacionais. Ainda segundo Beraldo (1987):

“É de se esperar que, gradativamente, a aplicação da modelagem matemática dos processos de cominuição venha complementar ou mesmo substituir o enfoque sob o ponto de vista exclusivo da energia consumida. É de se notar que, dada a sua base teórica, contrariamente ao ponto de vista energético totalmente empírico, o método cinético poderá propiciar uma oportunidade muito mais ampla para desenvolvimento de novas tecnologias de processo de cominuição.”

Não se pode negar de forma alguma a contribuição para o desenvolvimento das operações de cominuição de teorias de bases empíricas surgidas com Kick (1883), Rittinger (1857) e, sobretudo, a teoria de Bond (1952), esta última com grande aplicação na moagem de minérios.

Todavia, a utilização de modelos cinéticos para moagem representa um avanço na tecnologia de processos minerais, uma vez que permite determinar não apenas uma referência granulométrica, mas toda a distribuição de tamanhos, proporcionando a visão do processo como um todo, através da integração com modelos conhecidos para outras operações unitárias como classificação.

Porém, assim como a Lei de Bond possui restrições quanto a sua aplicação por não considerar o W_i como função das variáveis de processo e pela necessidade da adoção de fatores de correção introduzidos pelo próprio Bond e, posteriormente, por Rowland, os modelos cinéticos também possuem limitações. Desta forma, os dois diferentes tipos de abordagem, energética e cinética, não concorrem entre si, mas antes, se complementam, contribuindo de forma inegável para um melhor desempenho das operações de moagem.

1.2 Objetivos.

O avanço dos recursos computacionais permitiu que a aplicação da abordagem cinética para o estudo de operações de cominuição fosse cada vez mais usual. É ideal que os profissionais de processo na indústria mineral se utilizem destas ferramentas existentes durante o dimensionamento e otimização de circuitos de moagem.

Este trabalho tem por objetivo mostrar e discutir como a utilização da abordagem cinética para a moagem, aliada ao uso de softwares de processo mineral, contribui na elaboração de projetos conceituais através da simulação de operações em escala industrial a partir de testes piloto, permitindo inclusive, ajustes em partições e cargas circulantes para o posterior escalonamento.

1.3 Revisão da Literatura

1.3.1. Abordagem Energética

Pode-se expressar a relação entre energia consumida e um tamanho representativo d_r pela seguinte equação diferencial, onde $f(d_r)$ é uma função decrescente, refletindo o fato de que maiores quantidades de energia são requeridas para se conseguir menores tamanhos na cominuição:

$$\frac{\partial E}{\partial d_r} = f(d_r) \quad (1)$$

Foi observada experimentalmente a expressão de Charles:

$$f(d_r) = -Kd_r^{-n} \quad (2)$$

onde:

K e n são constantes (dependem do material a ser cominuído).

Substituindo-se $f(d_r)$, tem-se que:

$$\frac{\partial E}{\partial d_r} = -Kd_r^{-n} \quad (3)$$

Integrando a equação a partir da condição inicial $E = 0$, obtém-se:

$$E = \frac{K}{n-1} \left(\frac{1}{d_r^{(n-1)}} - \frac{1}{d_{rI}^{(n-1)}} \right) \quad (4)$$

A equação acima representa as teorias de Kick, Rittinger e Bond estabelecidas em 1883, 1857 e 1952 respectivamente.

Para n igual a 1 temos a equação de Kick:

$$E = K \ln \frac{d_{rI}}{d_r} \quad (5)$$

A Lei de Kick considera que a energia consumida é proporcional à relação de redução de tamanho

Esta lei pode ser aplicada principalmente à fragmentação de matacões.

Para n igual a 1,5 temos a equação de Bond:

$$E = 2K \left(\frac{1}{d_r^{1/2}} - \frac{1}{d_{rI}^{1/2}} \right) \quad (6)$$

Segundo a equação desenvolvida por Bond, o requerimento de energia em um processo de cominuição é inversamente proporcional á raiz quadrada do tamanho de referência.

Fred C. Bond, a partir de dados empíricos, estabeleceu um método de dimensionamento de moinhos tubulares adequado à realidade, uma vez que se baseou nos moinhos industriais em operação na época.

Para n igual a 2 temos a equação de Rittinger:

$$E = K \left(\frac{1}{d_r} - \frac{1}{d_{r1}} \right) \quad (7)$$

A lei de Rittinger estabelece que a energia consumida é proporcional ao aumento da nova superfície produzida pela fragmentação e se aplica de maneira satisfatória à fragmentação muito fina.

1.3.2. Abordagem Cinética

A cinética do processo de cominuição é representada por três funções: Seleção, Quebra e Classificação.

- **Função Seleção.**

De maneira simplificada, a Função Seleção representa a probabilidade que uma partícula possui de sofrer cominuição.

Essa probabilidade S é expressa pela relação:

$$S_j = \frac{W_j(F) - W_j(P)}{W_j(F)} \quad (8)$$

Onde, $W_j(F)$ representa a massa inicial de material de determinada graduação granulométrica e $W_j(P)$ representa a massa de material desta mesma graduação granulométrica que não sofreu cominuição.

Em se tratando especificamente de moinhos tubulares, a função seleção é determinada por velocidades de quebra S_j , ou seja, possui característica cinética. A velocidade específica de quebra é definida como a relação entre a velocidade de quebra e a massa existente:

$$S_j = - \frac{\partial W_j}{\partial t} / W_j \quad (9)$$

A expressão acima pode ser integrada e originar a seguinte equação:

$$W_j(t) = W_j(0) \exp(-S_j t) \quad (10)$$

A Função Seleção depende principalmente das condições da moagem tais como distribuição de tamanhos da carga bola, % de velocidade crítica e grau de enchimento.

- **Função de Quebra.**

A Função de Quebra B_{ij} representa a distribuição granulométrica proveniente da quebra primária de uma partícula. Significa que cada partícula, ao se quebrar, gera uma distribuição granulométrica característica, sendo que as partículas menores geradas pela quebra se misturam à carga do moinho e são submetidas a novas quebras.

Logo, a Função de Quebra B_{ij} é a fração de material de tamanho j que, ao se quebrar, aparece em tamanhos menores i , sendo representada em forma de distribuição granulométrica acumulada.

Os valores resultantes da Função de Quebra dependem principalmente do material a ser cominuído.

- **Função Classificação.**

A Função Classificação é pouco importante em moinhos de bolas e representa a operação de classificação que retém partículas mais grossas e impede a sua passagem para um evento de quebra seguinte. Em moinhos de barras, a Função Classificação se apresenta como característica essencial, uma vez que o efeito de “peneiramento” do material efetuado pelas barras proporciona uma quebra preferencial das partículas grossas.

Conclui-se que um processo de moagem em moinho de bolas pode ser representado basicamente pela associação de duas funções, Quebra e Seleção, ou seja, pelo tratamento individual de cada intervalo granulométrico, através do modelamento da granulometria resultante da quebra de cada intervalo de tamanho de partícula e da velocidade que esta quebra acontece para cada um destes tamanhos. Um fator importante na determinação da cinética de quebra é a distribuição de tamanhos do corpo moedor, uma vez que esta distribuição esta ligada diretamente à probabilidade de uma partícula de determinado tamanho receber ou não um impacto necessário para a sua cominuição.

1.3.3. Modelos Utilizados no Simulador

- **Ball Mill 2**

Uma aproximação cinética simplificada baseada nos estudos de Austin (1984) e Herbst e Bascur (1979) constante no software *Usimpac 3.1* da *Caspeo* foi utilizada para a calibração do modelo de moagem do presente trabalho.

Este modelo utiliza os princípios de Função Quebra e Seleção já mencionados, porém apresenta uma simplificação da cinética representando a duas funções em uma única equação:

$$B_{ij}S_j = K_i = K_1 d_i^{\alpha_1} = K_1 \cdot \exp\left(\alpha_1 \ln \frac{d_i}{d_1} + \alpha_2 \left(\ln \frac{d_i}{d_1}\right)^2\right) \quad (11)$$

Onde d_i é o tamanho da partícula da classe i e d_1 equivale a 1mm e corresponde ao tamanho da partícula de referência.

A energia consumida pelo moinho é calculada em função de suas características através da fórmula utilizada no método de dimensionamento de moinhos da Allis Chalmers:

$$W_{st} = 4.879 D^{0.3} (3.2 - 3T_c) V_r \left[1 - \frac{0.1}{2^{9-10V_r}} \right] + \varepsilon_s \frac{1.102}{50.8} (D_b - 12.5D) \quad (12)$$

Onde:

W_{st} representa a potência (Kw) consumida por tonelada curta de material;

D representa o diâmetro do moinho (m);

T_c representa o percentual do volume do moinho com a carga de bolas;

V_r representa a fração da velocidade crítica;

ε_s equivale a 1 ou 0, caso seja levado ou não em consideração o fator de bolas no cálculo da potência;

D_b representa o diâmetro do maior tamanho de bola;

Considera-se que K_1 depende da energia consumida durante a moagem de acordo com a relação dada por Herbst:

$$K_1 = K_1^E \left(\frac{P}{H} \right) \quad (13)$$

Onde P equivale à energia disponível para moagem e H ao *hold up* do material.

Para este modelo, os valores de α_1 , α_2 e K_1^E são determinados através da calibração a partir de um teste piloto.

Finalmente, a distribuição granulométrica da descarga do moinho é computada através da equação:

$$P_i = F_i \left(1 + \frac{K_i P}{NQ} \right)^{-N} \quad (14)$$

Onde:

P_i representa a proporção em massa de partículas mais grossas que a classe de tamanho i na descarga do moinho;

F_i representa a proporção em massa de partículas mais grossas que a classe de tamanho i na alimentação do moinho;

P representa a potência consumida pelo moinho (kw);

Q representa vazão de sólidos;

N representa o número de *mixers* perfeitos em série;

2 Material e Métodos.

2.1 Etapa 1 – Testes Piloto

Os estudos se basearam em dois testes piloto de moagem para uma mesma amostra minério de ferro, executados no Centro de Pesquisas Tecnológicas da CVRD na Mina de Alegria, sendo:

- Teste 1 - com pré-classificação da fração menor que 0,15mm;
- Teste 2 - sem pré-classificação da fração menor que 0,15mm;

Tabela 1: Distribuição Granulométrica da Alimentação dos Testes 1 e 2.

Tamanho (mm)	% Passante Acumulada	
	Teste 1	Teste 2
19.000	100.00	100.00
10.000	97.76	99.17
8.000	95.35	97.19
2.400	70.92	87.71
1.000	55.25	82.29
0.600	47.58	79.34
0.300	38.99	75.52
0.210	34.69	73.50
0.150	27.05	68.99
0.105	21.95	61.16
0.075	14.44	49.95
0.037	4.52	22.90

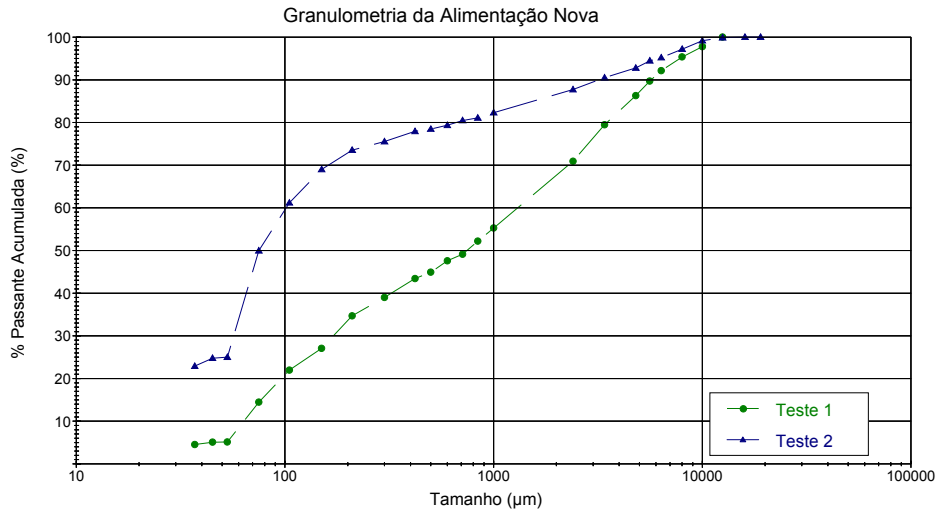


Figura 1: Gráfico da Granulometria da Alimentação Nova dos Testes 1 e 2.

As dimensões e os parâmetros utilizados para o moinho durante o teste piloto estão descritas na Tabela 2:

Tabela 2: Dados do Moinho – Teste Piloto.

Diâmetro (m)	1.54
Relação Comprimento Diâmetro	0.64
% de Carga de Bolas	33.0
Fração da Velocidade Crítica	0.645
Densidade real das Bolas	7.80

Segue abaixo o fluxograma do Usimpac referente ao circuito piloto:

Usimpac - Teste de Moagem/ Usina Piloto

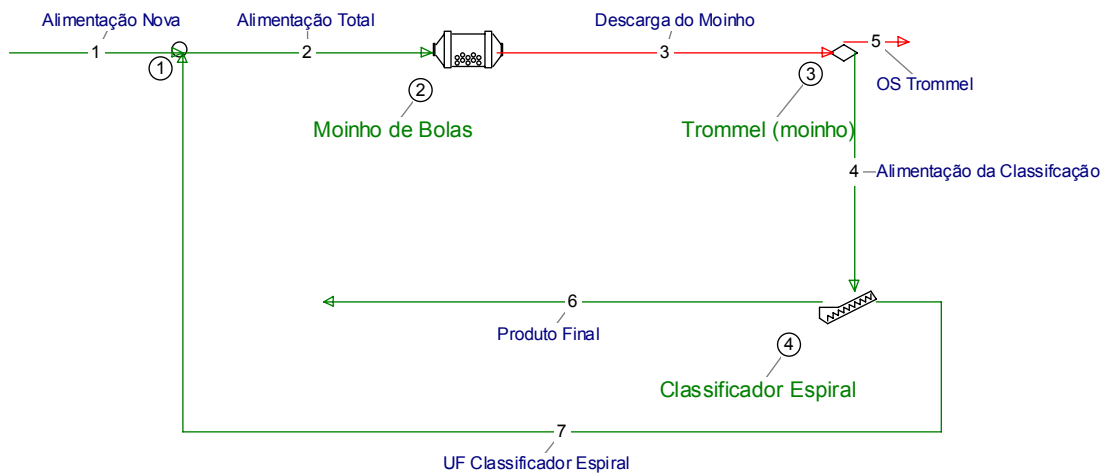


Figura 2: Fluxograma do Usimpac referente aos Testes Piloto.

2.2 Etapa 2 – Calibração e Simulação.

Após a reconciliação dos dados de cada teste via Balanço de Massas com o software BILMAT, efetuou-se a calibração do modelo *Ball Mill 2* no Usimpac apenas para o Teste 1.

Os parâmetros obtidos pela calibração do moinho no Teste 1 foram utilizados na simulação direta do Teste 2 e em seguida comparados com o resultado do balanço de massas deste teste.

Para todos os testes foi utilizado um modelo simples *Nível 0* na operação de classificação.

Este modelo *Nível 0* determina os parâmetros relativos à curva de partição para o equipamento de classificação a partir dos resultados gerados no balanço de massas, mantendo-os constantes durante a simulação.

2.3 Etapa 3 – Escalonamento para um Circuito Industrial.

Com o modelo calibrado, executou-se o escalonamento do Teste 1 para um circuito industrial hipotético conforme as seguintes premissas:

Tabela 3: Premissas Adotadas para o Circuito Industrial.

Taxa de Alimentação Nova (t/h)	350
Carga Circulante (%)	200
% de Carga de Bolas	30.0
Fração da Velocidade Crítica	0.700
Densidade real das Bolas	7.80

Durante o escalonamento para o circuito industrial, a curva de partição da classificação foi alterada de forma a representar a operação com Hidrociclones ao invés do Classificador Espiral utilizado nos testes piloto.

3 Resultados.

Os valores gerados para os parâmetros de calibração do modelo *Ball Mill 2* estão descritos a seguir:

Tabela 4: Parâmetros do modelo *Ball Mill 2* determinados pelo Teste1.

Specific rate of breakage per component (K1E)	Exponent 1 per component for the size dependance of K	Exponent 2 per component for the size dependance of K
7.5	1.72	0.02

As granulometrias e vazões de sólido resultantes da calibração do Teste 1, bem com da simulação do Teste 2, comparadas com os balanços de massas dos respectivos testes estão descritas nos gráficos e tabela a seguir:

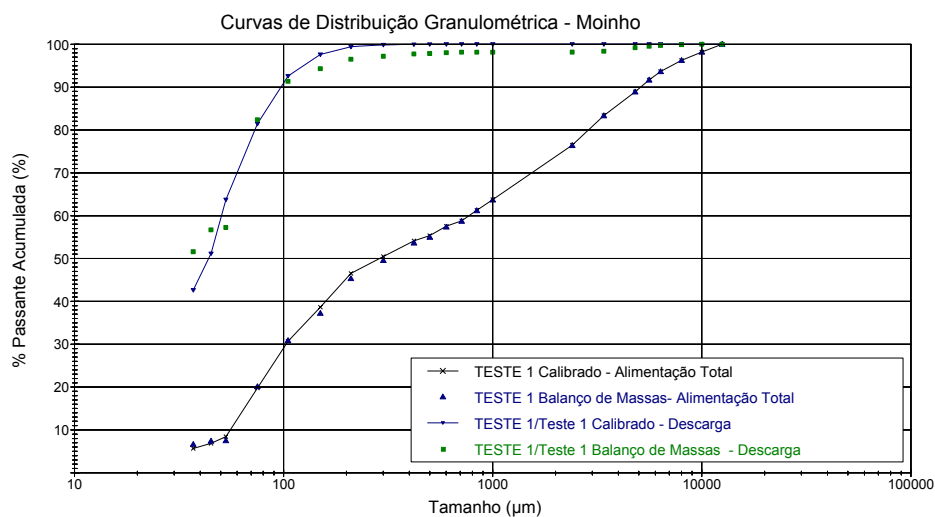


Figura 3: Granulometria da Alimentação e Descarga do Moinho no Teste 1.

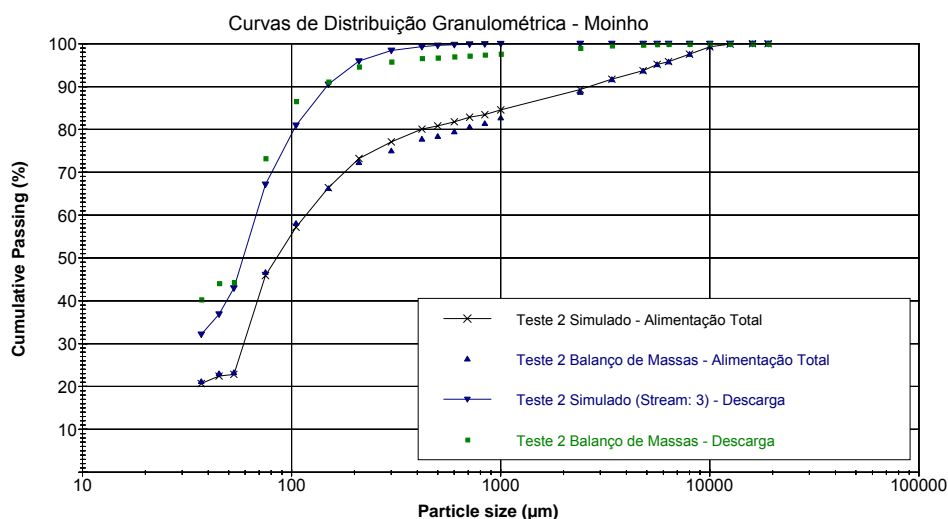


Figura 4: Granulometria da Alimentação e Descarga do Moinho no Teste 2.

Tabela 5: Taxa de sólidos em t/h para os Testes 1 e 2.

Fluxos	Massas em t/h			
	Teste 1		Teste 2	
	Calibrado	Balanço de Massas	Simulado	Balanço de Massas
1 Alimentação Nova	1.240	1.240	4.438	4.438
2 Alimentação Total	1.531	1.530	5.093	5.038
3 Descarga do Moinho	1.531	1.530	5.093	5.039
4 Alimentação da Classificação	1.500	1.490	5.093	5.010
5 OS Trommel	0.031	0.030	0.000	0.029
6 Produto Final	1.209	1.210	4.438	4.409
7 UF Classificador Espiral	0.291	0.290	0.655	0.600

Seguem abaixo as curvas de partição da classificação calibradas para os testes 1 e 2, bem como a curva adotada como premissa no escalonamento para o circuito industrial:

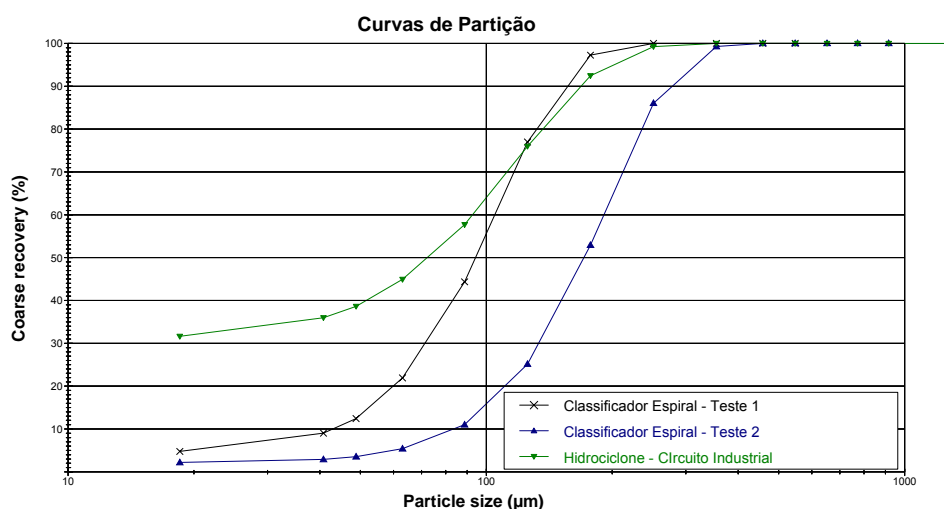


Figura 5: Curvas de Partição referentes aos Testes 1 e 2 Circuito Industrial.

Os parâmetros adotados para a curva de partição corrigida relativa à classificação com Hidrociclones no circuito industrial estão descritos na Tabela 6:

Tabela 6: Parâmetros da Curva de Partição Adotada para a Ciclonação no Circuito Industrial.

By pass (%):	31.62
Imperfeição	0.36
D50 (µm):	103.51

A simulação do circuito industrial com a granulometria referente à alimentação do Teste 1 resultou no dimensionamento de um moinho de 15 x 19 pés conforme a Tabela 7:

Tabela 7: Moinho Dimensionado a Partir da Simulação.

Diâmetro (m)	4.6
Relação Comprimento Diâmetro	1.26
% de Carga de Bolas	30
Fração da Velocidade Crítica	0.7
Densidade real das Bolas	7.8
Potência Calculada (kw)	1615.51

Segue abaixo a referência granulométrica obtida para os produtos finais em cada um dos testes e para o circuito industrial simulado:

Tabela 8: Referência granulométrica do Produto Final.

Parâmetro	Teste 1	Teste 2	Circuito Industrial
D95 (µm) :	90	140	146

4 Discussão e Conclusões

Uma vez comparados os resultados, pôde-se notar que o produto referente à descarga do moinho simulado para o Teste 2, a partir dos parâmetros cinéticos obtidos no Teste 1, se aproximou dos resultados reais obtidos na usina piloto, tanto em termos de granulometria como de massa.

Este resultado pode ser explicado pelo fato de que a Função de Quebra depende basicamente do material a ser cominuído e a Função Seleção depende basicamente das condições da moagem, sendo que as mesmas se mantiveram constantes, uma vez que não ocorreram alterações nas características do minério (mas apenas de sua granulometria) e nas condições de moagem (foi utilizado no Teste 2 o mesmo moinho nas mesmas condições operacionais do Teste 1)

Comprova-se que o modelo cinético responde de maneira satisfatória a grandes variações simultâneas de granulometria e massa.

A abordagem energética também é considerada, sendo que o modelo cinético se utiliza desta abordagem ao efetuar uma relação entre potência consumida, *hold up* e cinética através da equação (13) de Herbst.

Como o modelamento é capaz de considerar as dimensões e condições de trabalho do moinho ao utilizar a sua potência nos cálculos de cinética, pode-se dimensionar um circuito industrial de moagem; pois, variáveis como: percentual de velocidade crítica, volume de carga de bolas e dimensões do moinho são computadas no cálculo da energia através da equação (12) de Allis Chalmers.

O moinho industrial foi dimensionado considerando a mesma cinética do moinho piloto, porém, na prática, pode ser verificada alguma diferença, fato que não impede que o dimensionamento seja efetuado de maneira satisfatória.

De toda forma, a abordagem cinética também possui suas deficiências, como o fato de não ser considerada a influência da porcentagem de sólidos no moinho, todavia, aliada aos recursos computacionais existentes, esta metodologia representa um avanço considerável nos estudos de moagem.

5 Referências Bibliográficas

[6.1] Chaves, A. P.; Peres, A.E.C. Peneiramento. In: Chaves, A.P.; Peres, A. E.C. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios / Britagem, Peneiramento e Moagem – Volume 3 . 1ª. Edição. São Paulo, São Paulo: Svedala, Signus Editora Ltda., Brasil Mineral: 1999, seção 11, p. 564

[6.2] Beraldo, J. L. Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares. São Paulo, São Paulo : Editora Edgard Blücher Ltda, 1987, cap.1, p. 6

[6.3] AUSTIN, L.G. Klimpel, R.R., and LUCKIE, P.T. , Process Engineering of size reduction: ball milling. AIME, New York, 1984, Chap. 4.8.

[6.4] HERBST, J.A. and BASCUR, O.A., A program for the simulation of steady state circuit behavior, using a small computer. Report of Department of Metallurgical Engineering, University of Utah, Slat Lake City, 1979.

[6.5] Beraldo, J. L. Moagem de Minérios em Moinhos Tubulares. São Paulo, São Paulo : Editora Edgard Blücher Ltda, 1987, cap.2, p. 14

[6.6] Figueira, H.V.O.; Almeida, S.L.M.; Luz, A.B.. Cominuição. In: Luz, A.B.; Sampaio, J.A.; Almeida, S.L.M. Tratamento de Minérios 4^a. Edição, Rio de Janeiro: CETEM- MCT, 2004, cap. 4, p.152 – 194

[6.7] Pryor, E.J. Mineral Processing. Elsevier, London : London Applied Publishers Ltda : 1965

[6.8] Wills, B.A., BSc, PhD, C Eng, MIMM, Grinding Mills. In: Mineral Processing Technology. An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. International Series on Materials Science and Tecnology Volume 29. 2nd Edition. Camborne School of Mines, Cornwall, England : 1980, chapter 7, p. 151-187

[6.9] BRGM, Caspeo, USIM PAC.: Unit Operation Model Guide version 3.1.1.0. Caspeo. 3 avenu Claude Guillemin – BP 6609, 45060, Orleans, Cedex 2, France. BRGM is the author of USIM PAC. Copyright BRGM 1986-2004 Caspeo 2004-2006