

# IMPLEMENTAÇÃO DE UM MODELO PARA SIMULAÇÃO E ESCALONAMENTO DE PENSAS DE ROLOS DE ALTA PRESSÃO<sup>1</sup>

Claudio L. Schneider<sup>2</sup>  
Vladmir K. Alves<sup>3</sup>

## Resumo

O objetivo deste trabalho é implementar um modelo robusto para Prensas de Rolos de Alta Pressão em um simulador comercial. Prensas de rolos de alta pressão geram distribuições granulométricas no produto que podem ser classificadas como auto-similares. O processo de moagem inclui uma zona de pré britagem, onde partículas maiores que o vão operacional são britadas, e uma zona de compressão, onde a moagem ocorre por fratura interpartículas. Uma série de amostras de itabirito compacto foi preparada em faixas estreitas de tamanhos e utilizadas para testar a auto-similaridade quando moídas em uma PRAP de bancada. Testes em britador de rolos convencional foram realizados para modelar a etapa de pré britagem. O modelo de Austin para PRAP foi implementado em uma rotina de otimização para determinar parâmetros que descrevem os processos envolvidos. Testes com amostras em sua distribuição granulométrica natural foram realizados em escalas de bancada e semi-industrial, com o objetivo de testar o modelo implementado quanto à distribuição granulométrica no produto, bem como potência e capacidade de moagem.

**Palavras chave:** Moagem; Alta pressão; Modelamento; Escalonamento.

## IMPLEMENTATION OF A MODEL FOR SIMULATION AND SCALE-UP OF HIGH PRESSURE GRINDING ROLLS

### Abstract

High Pressure Grinding Rolls (HPGR) have become a feasible alternative for hard rock grinding with potential applications for compact itabirites, replacing crushing stages and reducing overall energy consumption. This fact has generated a demand for simulation and scale-up models for this process, with practical engineering applications. Here, the chief objective is to implement one such model in a commercial simulating package. HPGRs generate self-similar size distributions in the product when grinding particles of the same material at different feed sizes, and this is the basis of the model for predicting product size distribution. A crushing zone model must also be included for particles larger than the operating gap in the feed stream. A series of closely sized particle samples were prepared and ground in a bench scale HPGR in order to test the model. Austin's HPGR model has been implemented in an optimizing engine in order to get appropriate parameters for breakage and selection functions from the experimental tests. Semi-industrial HPGR tests were carried out to test the model with respect to the product size distribution, capacity and specific power requirements.

**Key words:** Grinding; High pressure; Modeling; Scale-up

---

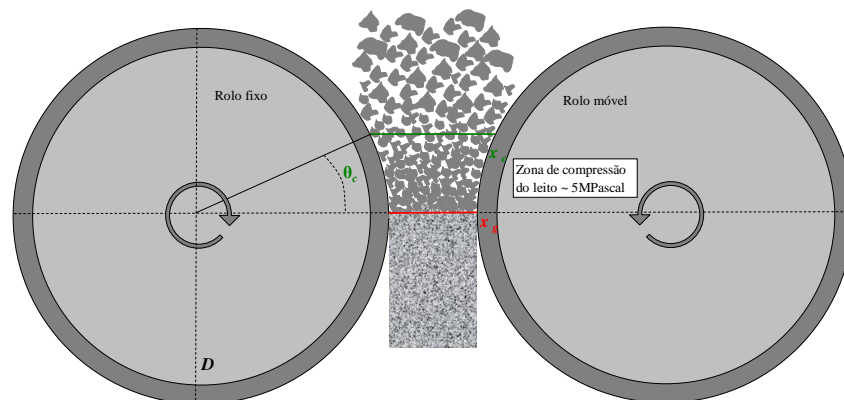
<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao VIII Seminário Brasileiro de Minério de Ferro, 18 a 21 de setembro de 2007, Salvador - BA, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro de Minas, Ph.D., CETEM - Centro de Tecnologia Mineral, claudio@mineraltech.com*

<sup>3</sup> *Engenheiro de Minas, M.Sc., CVRD, vladmir.alves@cverd.com.br*

# 1 INTRODUÇÃO

A Figura 1 (fora de escala) ilustra um material de alimentação sendo comprimido em segmentos horizontais a medida em que é puxado (*nipped*) como um leito particulado e se move em direção ao vão (*gap*) entre os rolos. Em princípio, as forças compressivas (horizontais) em cada segmento diferencial podem ser calculadas, e variam de zero no ângulo crítico (*nip angle*) até um máximo, na altura do vão. Partículas frágeis quebram no topo e produzem fragmentos menores que se movem para baixo e requebram juntamente com as partículas menos friáveis da alimentação. Isto ocorre até o vão, onde a pressão é aliviada.



**Figura 1** Representação esquemática do fluxo de material em direção ao vão operacional entre rolos.

Este é um sistema difícil de se estudar porque a quebra em cada secção não pode ser medida, e somente a distribuição granulométrica do produto final pode ser obtida. Por esta razão algumas simplificações (que aparentemente funcionam bem) devem ser feitas. Assume-se que não importa onde no sistema um tamanho em particular (e.g.  $\sqrt{2}$  de tamanho de peneira) é produzido, uma vez que, no final, a chance de uma partícula sair sem quebrar depende da sua resistência relativamente à força que ela experimenta, ou seja, a pressão no vão entre rolos. Assume-se também que a distribuição de friabilidade das partículas de um dado tamanho é a mesma para as partículas produzidas no moinho e para as partículas na alimentação do mesmo.

## 1.1 Fratura por Estorço (*Nipping Breakage*) no Vão

Quando um britador de duplo rolos lisos roda em condições de alimentação normal (*non-choke feed*), cada partícula é beliscada (*nipped*) e quebrada ou passa através do vão do britador sem quebrar, independentemente da presença de outras partículas. Se alimentação forçada (*choke feed*) é utilizada, um leito de partículas pode chegar ao vão entre rolos e passar por ele de forma comprimida. Uma vez que o vão (ou fresta) é fixo (diferentemente da PRAP) uma situação pode surgir na qual os rolos estão comprimindo um leito altamente incompressível, gerando forças altíssimas nos rolos, muito maior do que aquelas requeridas para comprimir e fraturar partículas individuais. Quando esta situação aparece, ela é evitada diminuindo a taxa de alimentação, e evitando a alimentação forçada. No entanto, foi descoberto que em alimentações não-forçadas, para cada tamanho (em uma série de intervalos de tamanhos de  $\sqrt{2}$ ) existe uma fração que passa a fresta entre os rolos sem quebrar. Obviamente a fração que quebra é 1 para partículas muito maiores que a fresta e zero para partículas muito menores que a fresta. Porém, para tamanhos similares ao tamanho da fresta, a variedade de formas de partícula e probabilidades de orientação com respeito à fresta produz uma distribuição de probabilidades de quebra. A equação usada por Austin<sup>[1]</sup> é:

$$a_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + \left(\frac{x_i}{\mu x_g}\right)^{-\lambda}} & , n > i \geq 1 \\ 0 & , i = n \end{cases} \quad (1)$$

onde  $a_i$  é a fração em massa das partículas do intervalo de tamanhos  $i$  que quebra,  $x_i$  é o tamanho da peneira de cima do intervalo de tamanhos indexado por  $i$  e  $\mu$  e  $\lambda$  são números característicos independentes do tamanho  $x_i$  ou do tamanho da fresta  $x_g$ . Para rolos lisos,  $\lambda = 6,7$  para todos os materiais testados.<sup>[2]</sup> Este valor alto de  $\lambda$  significa que  $a_i \rightarrow 1$  para  $x_i/x_g > 1$  e  $a_i \rightarrow 0$  para  $x_i/x_g < 1$ .

Este conceito será usado no modelo porque se o leito de compressão não quebra uma partícula grande, então ela certamente quebrará quando ela for beliscada (*nipped*) pelos rolos em alguma altura da fresta.

## 1.2 Modelo de Compressão Mais Estorcego

Primeiramente, definimos a pressão formal de moagem<sup>[3]</sup> como

$$P = \frac{\psi}{DL} \quad (2)$$

onde  $P$  é a pressão de moagem,  $\psi$  é a força horizontal nos rolos,  $D$  é o diâmetro dos rolos e  $L$  o comprimento. Em geral  $D/L$  será uma razão fixa. A pressão máxima na fresta será mais alta do que, mas proporcional a,  $P$  e  $P$  pode ser usado como uma medida das condições de quebra do leito comprimido.

Considera-se a distribuição granulométrica do produto produzido por uma alimentação toda de tamanho 1. Igual-se a fração de material no intervalo de tamanhos indexado por  $i$  que é quebrada em uma passagem pelo moinho a  $a_i$ , com a fração não quebrada sendo  $1-a_i$ , devido à compressão no leito. A fração remanescente é  $p_1 = (1-a_1)(1-a_1)$  = fração do tamanho 1 no produto. A fração que passa para o tamanho 2 é  $b_{2,1}a_1 + b_{2,1}a_1(1-a_1)$ , onde  $b_{2,1}$  é o valor de  $b$  para quebra por estorcego (*nipping breakage*) e  $b_{2,1}$  é o valor correspondente para quebra por compressão. Assumindo-se que  $b_{2,1} = b_{2,1}$ , pode-se escrever (convenientemente)

$p_2^* = b_{2,1}a_1 + b_{2,1}a_1(1-a_1)$ . A fração de material que permanece depois da quebra por estorcego é  $1-a_2$  e a fração remanescente depois da quebra por compressão é  $1-a_2$ ,

dando  $p_2 = p_2^*(1-a_2)(1-a_2)$ . A massa de material por unidade de alimentação que passa

para o tamanho 3 é  $p_3^* = [b_{3,1}a_1 + b_{3,1}a_1(1-a_1)] + [b_{3,2}a_2p_2^* + b_{3,2}a_2(1-a_2)p_2^*]$  e

$p_3 = p_3^*(1-a_3)(1-a_3)$  A expressão geral é:

$$p_i^* = \begin{cases} 0 & , i = 1 \\ b_{i,1}a_1^* + \sum_{j=1}^{i-1} b_{i,j}a_j^*p_j^* & , n \geq i > 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$p_i = \begin{cases} 1-a_i^* & , i = 1 \\ 1-a_i^*p_i^* & , n \geq i > 1 \end{cases}$$

onde  $a_i^* = a_i + a_i(1-a_i)$  e  $a_n = 0$ ,  $a_n^* = 0$ .

Uma simplificação é feita de forma que a função distribuição de quebra seja normalizável. Neste caso  $b_{i,j}$  pode ser substituído por  $b_{i-j}$ ,  $n \geq i \geq j$ . Também se assume que a função quebra primária na sua forma cumulativa pode ser expressa como

$$B_{i,j} = \phi \left( \frac{x_{i-1}}{x_i} \right)^\gamma + (1-\phi) \left( \frac{x_{i-1}}{x_i} \right)^\beta, \quad n \geq i > 1 \quad (4)$$

com

$$b_{i-j} = \begin{cases} B_{i-j} - B_{i+1-j} & , n > i > j \\ B_{n-j} & , i = n \end{cases} \quad (5)$$

O tratamento acima é baseado em uma alimentação toda no tamanho 1, que é  $f_1 = 1$ . No entanto, foi demonstrado que a distribuição de tamanhos do produto medida para uma alimentação consistindo de quatro tamanhos distintos é igual àquela prevista pela combinação linear das distribuições de tamanhos nos produtos previstas para cada uma das alimentações individual e independentemente.<sup>[4]</sup> Assumindo-se que isto seja verdade para qualquer distribuição de tamanhos na alimentação, o vetor de valores  $p_i$  determinados para uma alimentação de tamanho 1 pode ser generalizado para a matriz de valores para alimentações de tamanhos  $j$ , já que o que é chamado de tamanho 1 é altamente arbitrário. Portanto a equação (3) pode ser mais generalizada para

$$\left. \begin{aligned} d_{i,j}^* &= \begin{cases} 0 & , i = j \\ b_{i-j} a_j^* + \sum_{k=j}^{i-1} b_{i,k} a_k^* d_{k,j}^* & , n \geq i > j \end{cases} \\ a_i^* &= \begin{cases} 0 & , i = n \\ a_i + a_i^* (1 - a_i) & , i < n \end{cases} \\ d_{i,j} &= \begin{cases} 1 - a_i^* & , i = j \\ 1 - a_i^* d_{i,j}^* & , n \geq i > j \end{cases} \\ p_i &= \sum_{j=1}^i d_{i,j} f_j \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

onde  $f_i$  é a fração da alimentação no intervalo de tamanhos  $i$ .

A matriz dos valores  $d_{i,j}$  é a matriz de transferência e  $d_{i,j}$  são os parâmetros de transferência, ou seja, a fração da alimentação que tem tamanho  $j$  que sai no produto no intervalo de tamanho  $i$ . Notar que quando  $i > j$ ,  $d_{i,j} = 0$ , como expresso nas desigualdades.

A última parte da equação (6) pode ser escrita em forma de uma operação matricial

$$p = d f \quad (7)$$

se os zeros são entrados de forma apropriada na matriz  $d$ . O tempo de computação está na geração da matriz. Considerando-se a capacidade computacional dos computadores pessoais mais comuns dos dias de hoje, este tempo computacional é absolutamente irrelevante.

### 1.3 Implementação do Modelo Combinado

A implementação do modelo combinado requer um par de funções seleção, uma especificamente para o processo de quebra por estorço (*nipping*) e outra para quebra por

compressão, e um par de funções quebra normalizáveis, igualmente para estorço e quebra por compressão. O modelo implementado utiliza as seguintes formas funcionais para estes processos:

Função seleção de estorço:

$$a_i = \frac{1}{1 + \left( \frac{\mu x_g}{x_i} \right)^\lambda} \quad (8)$$

Função seleção para quebra por compressão:

$$\left. \begin{aligned} a_i &= \left( \frac{x_i}{k} \right)^\alpha, & x_i > k \\ a_i &= 1, & x_i \leq k \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Função quebra do processo de estorço:

$$B_{i,j} = \phi \left( \frac{x_{i-1}}{x_i} \right)^\gamma + (1 - \phi) \left( \frac{x_{i-1}}{x_i} \right)^\beta, \quad n \geq i > 1 \quad (10)$$

Função quebra do processo de compressão:

$$B_{i,j} = \phi' \left( \frac{x_{i-1}}{x_i} \right)^{\gamma'} + (1 - \phi') \left( \frac{x_{i-1}}{x_i} \right)^{\beta'}, \quad n \geq i > 1 \quad (11)$$

Os parâmetros do modelo são, portanto,  $\mu$ ,  $\lambda$ ,  $\kappa$  e  $\alpha$  para as funções seleção e  $\phi$ ,  $\gamma$ ,  $\beta$ ,  $\phi'$ ,  $\gamma'$ ,  $\beta'$  para as funções quebra. A implementação do modelo requer que o tamanho da fresta  $x_g$  durante a operação da PRAP seja conhecido. Este parâmetro importante define a capacidade da PRAP, e é uma função da pressão de moagem, da geometria do equipamento e das características do material a ser prensado.<sup>[5]</sup>

## 2 IMPLEMENTAÇÃO DE UMA INTERFACE GRÁFICA PARA O CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO MODELO DE PRAP A PARTIR DE ENSAIOS EM PRENSA DE BANCADA

O sistema para o cálculo de parâmetros do modelo da PRAP é baseado no princípio em que os parâmetros das equações 8 a 11 sejam invariáveis com a distribuição de tamanhos da alimentação. Assim, para uma sequência de testes com partículas mono-tamanho e mantendo-se as condições operacionais constantes, existe um jogo de parâmetros que interpola as distribuições granulométricas medidas em cada teste com o modelo descrito acima.

O sistema desenvolvido é baseado em uma rotina de otimização de Rosenbrock. Esta escolha foi feita porque esta rotina não necessita de derivadas, e pode ser utilizada com restrições quanto aos valores que cada parâmetro pode assumir. O aplicativo calcula os parâmetros das equações (8), (9) e (11), mantendo os parâmetros da equação (10) invariáveis. Esta metodologia foi adotada porque os parâmetros da equação (10) podem ser medidos independentemente, em testes com um britador de rolos liso, utilizando alimentação não-forçada. O procedimento de teste requer que o vão do britador de rolos seja ajustado para o tamanho da peneira de baixo das partículas. Para vários tamanhos de

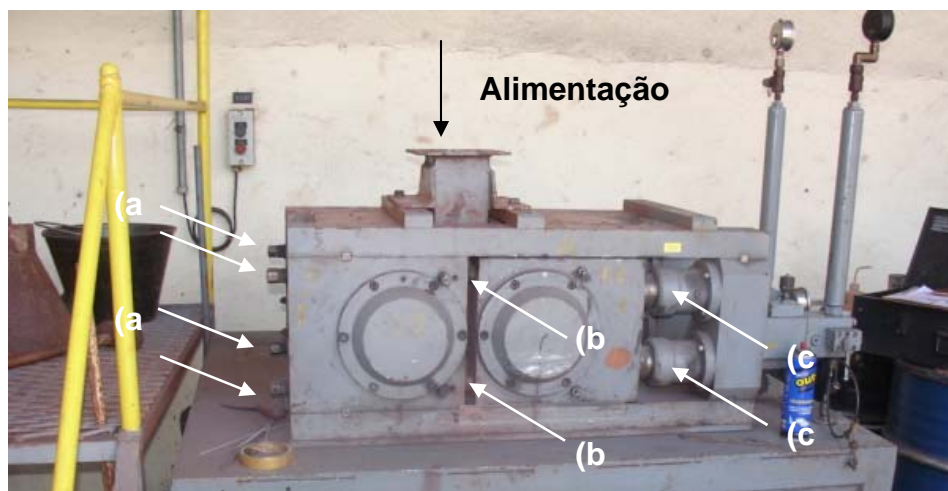
partícula, o mesmo jogo de parâmetros deve ajustar a função quebra medida, assumindo-se que esta seja normalizável. Neste mesmo teste, a fração de partículas maiores que ovão que passam pelo britador de rolos sem quebrar, também é medida. Este parâmetro depende da forma das partículas.

O cálculo dos parâmetros da função quebra por estorço é fundamentalmente baseado no modelo de função quebra utilizado, e é conseqüentemente, bastante simples.

### 3 EXPERIMENTAL

O trabalho experimental consistiu na preparação de amostras de Itabirito duro em faixas estreitas de tamanhos seguindo uma série de  $\sqrt{2}$ , a partir de 4 mm de *top size*, em lotes de aproximadamente 7 kg cada. Amostras compostas do minério britado < 4 mm também foram preparadas para testes de longa duração, em lotes de 5 e 20 kg. Estas amostras foram utilizadas em testes de moagem realizados em uma prensa PRAP de bancada Polysius, localizada no laboratório de caracterização da CVRD em Vitória.

A prensa de bancada utilizada possui um sistema de aquisição de dados acoplado. Dados disponíveis neste sistema são as pressões de óleo nos pistões direito e esquerdo do rolo móvel, e a potência nos motores do rolo fixo (esquerdo) e móvel (direito). A velocidade dos rolos pode ser escolhida entre 0.33 e 0.66 m/s. Todos os testes foram realizados com 0.33 m/s, exceto um teste com amostra composta de 20 kg. A fresta inicial (*gap zero*) pode ser ajustada posicionando-se 4 batentes que regulam a posição da carcaça do rolo fixo em relação ao rolo móvel. O ajuste é feito a partir de parafusos localizados na parte posterior da carcaça do rolo fixo.



**Figura 2** Prensa de rolos Polysius usada nos testes com Itabirito duro. (a) parafusos para ajuste da posição dos batentes (*gap 0*); (b) batentes separando as carcaças dos rolos móvel e fixo, lado esquerdo; (c) pistões do rolo móvel, lado esquerdo.

É importante medir a fresta resultante para um material, a pressão de moagem utilizada bem como a velocidade de rolos e a fresta inicial, uma vez que todas estas variáveis podem resultar em umvão operacional diferente. Como o moinho não está equipado para medir ovão operacional no sistema de aquisição de dados, todos os testes foram filmados com câmara digital, e uma estimativa do valor desta variável durante a moagem foi feita analisando-se as imagens de cada teste.

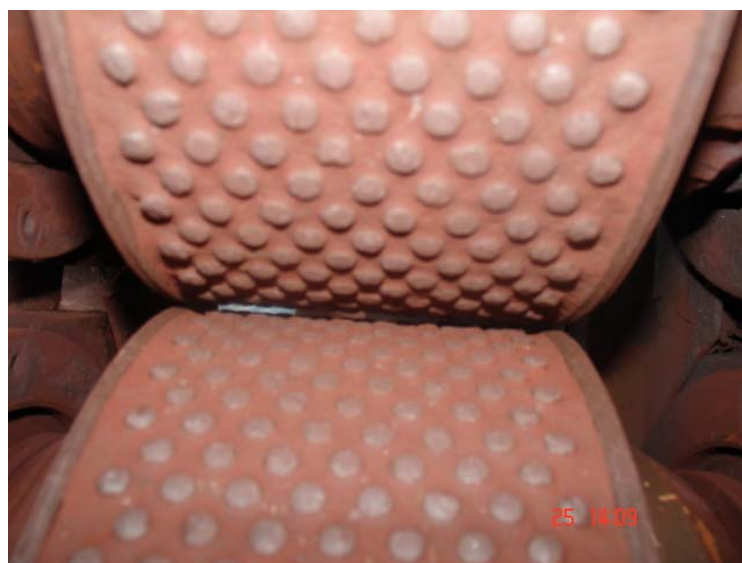
No detalhe da Figura 3 são mostrados dois quadros da moagem de uma amostra composta de 20 kg em um teste com pressão inicial de 5 MPascal (100 bar de pressão de óleo), com o detalhe do batente inferior do lado esquerdo. Pode-se ver claramente que o batente não toca a carcaça do rolo móvel durante a moagem, e toda a força dos pistões é exercida no material que está sendo cominuído, entre rolos. Um ajuste de escala permite medir, nestas imagens, quanto o rolo móvel se deslocou para a direita. Esta medida tem precisão de +/- 1

mm, já que a resolução da imagem é de aproximadamente 0.5 mm/pixel. Ainda, durante a moagem, existe pouca variação de posição, e o vão operacional é praticamente constante. Porém, pequenos movimentos podem existir, e a medida depende da correta escolha de um quadro da filmagem. Isso é muito difícil. Conseqüentemente, os resultados destas medidas um tanto rudimentares do vão operacional são ruidosos.



**Figura 3** Quadros obtidos a partir da filmagem dos testes. À esquerda, antes de o material ser alimentado e à direita, durante a moagem. Repare que o rolo móvel, à direita, é empurrado para a esquerda em direção ao rolo fixo pela pressão dos pistões. O batente evita que os rolos acavalem, mantendo uma distância mínima. Durante a moagem, o rolo móvel se desloca para a direita, pela ação de moagem, e toda a força dos pistões é exercida sobre o minério, entre os rolos. A distância entre o batente e a carcaça do rolo móvel é o vão entre rolos induzido pelo leito.

Ao vão entre rolos medido por diferença antes e durante a moagem de cada amostra, deve ser adicionado o valor do vão 0, ou seja, a distância inicial entre os rolos com a carcaça do rolo móvel apoiada nos batentes. Isso é ilustrado na Figura 4. Os rolos são revestidos com pinos, e esta é a configuração de um rolo industrial para moagem de minérios compactos. Os pinos protegem o revestimento dos rolos reduzindo significativamente o desgaste. Na Figura 4, o moinho está parado, e os rolos estão separados por uma distância fixa porque a carcaça do rolo móvel está apoiada nos batentes ajustáveis. Caso contrário os rolos estariam acavalados. Esta distância é apelidada de vão 0, ou seja, a fresta entre rolos sem qualquer material entre rolos. Isto é definido como a distância entre o topo dos pinos de cada rolo, e é ajustada usando-se barras de medição que são inseridas entre os rolos, e com uma chave de boca ajustando a posição dos batentes. Na Figura 4 o vão 0 medido é 1 mm. O ajuste deve ser feito com pressão nos pistões. Deve-se assegurar que os rolos estejam perfeitamente paralelos um em relação ao outro.



**Figura 4** Rolos da prensa de bancada com vão 0 ajustado em 1 mm.

Além do vão 0 e do vão produzido pela ação da moagem, deve-se considerar a distância entre rolos, descontada a altura dos pinos, já que a capacidade do moinho inclui todo o material que pode passar entre os pinos. Como os pinos revestem os dois rolos, a altura destes deve ser multiplicada por 2. Porém esta altura só é efetiva para a fração em área dos rolos que não é coberta por pinos. Em resumo,

$$x_g = \Delta x_g^{moagem} + x_g^p + (1 - f_p^A) 2h_p \quad (12)$$

onde  $\Delta x_g^{moagem}$  é o aumento de vão produzido pela moagem  $x_g^p$  é o vão inicial entre pinos,  $f_p^A$  é a fração da área dos rolos que é coberta por pinos e  $h_p$  é a altura dos pinos. Notar que o vão 0, nesta configuração, é  $x^0 = x_g^p + (1 - f_p^A) 2h_p$ . Para a PRAP de bancada, estes valores são sumarizados na Tabela 1. A fração em área de pinos foi calculada com base na área superficial do rolo ( $\sim 490.1 \text{ cm}^2$ ) e na área de um pino ( $\sim 0.283 \text{ cm}^2$ ) e considerando-se 52 fileiras com 8 pinos e 52 fileiras com 7 pinos, totalizando 780 pinos com  $220.54 \text{ cm}^2$ .

**Tabela 1** Dados operacionais da prensa de bancada.

HPGR Polysius de bancada	Valor	Unidade
Diâmetro dos rolos, $D$	250	mm
Largura dos rolos, $L$	100	mm
Altura dos pinos, $h_p$	1.2	mm
Área fracional dos pinos, $f_p^A$	45	%

Para este moinho, a pressão inicial de nitrogênio é sempre 75% da pressão de óleo, ou seja, para uma pressão de óleo da 100 bar, primeiramente a pressão de nitrogênio é ajustada para 75 bar. A pressão de moagem, sempre expressa em MPascal, é diferente da pressão de óleo, e é uma função do diâmetro dos cilindros. Isto varia de equipamento para equipamento, e neste caso a relação é

$$P = P^{oil} / 2 \quad (13)$$

Assim, quando a pressão inicial de óleo é ajustada para 100 bar = 10 MPascal, a pressão inicial de moagem é de 5 MPascal.

A Tabela 2 sumariza os testes realizados com as amostras de Itabirito duro. Cada amostra de mono-tamanho do Itabirito duro foi dividida em 3 lotes, o primeiro com 200 g para arquivo (densidade, granulometria, etc.) e os lotes restantes de aproximadamente 3,4 kg cada moídos em duas pressões distintas. O primeiro lote de 3,4 kg da cada amostra foi moído com uma pressão inicial de óleo de 80 bar. Assim todas as amostras geraram dados nesta pressão. O segundo lote de 3,4 kg foi moído alternando-se entre 100 e 60 bar de pressão, para cobrir uma faixa maior de valores de pressão inicial de moagem.

O tempo de moagem é uma variável importante que indica a capacidade da prensa para a condição operacional em questão. A taxa de produção pode ser calculada facilmente para cada teste. O tempo de moagem foi medido cronometrando-se o vídeo de cada ensaio. Estes valores podem ser checados contra os dados do sistema de aquisição computadorizado. Os valores de *gap* produzidos também foram medidos a partir das imagens obtidas nos testes. Os valores médios de potência e pressão de óleo foram obtidos através dos dados do sistema de aquisição. Estes valores são mostrados na Tabela 2.



**Tabela 2** Resultados das medidas de potência, pressão e produção para os testes com a amostra de Itabirito compacto

HPGR - TESTES LABORATÓRIO VITÓRIA - POLYSIUS POLYCOM									
Amostra: Itabirito Compacto Conceição									
Tamanho		Potência	Pressão	Gap	Tempo	Produção	Relatório #		
Superior	Fundo	kW	Mpascal	mm	s	kg/h			
52	37	1.90	5.50	3.11	7.51	1.67	POLYCOM	0011	-05
52	37	1.60	4.65	3.05	7.05	1.68	POLYCOM	0012	-05
74	52	1.50	4.35	3.91	8.00	1.53	POLYCOM	0013	-05
74	52	1.40	3.35	3.47	8.25	1.48	POLYCOM	0014	-05
106	74	1.80	5.60	4.15	9.51	1.29	POLYCOM	0015	-05
106	74	1.60	4.50	4.25	9.35	1.31	POLYCOM	0016	-05
148	106	1.50	4.50	4.14	10.58	1.16	POLYCOM	0017	-05
148	106	1.30	3.25	3.67	10.03	1.22	POLYCOM	0018	-05
209	148	1.60	5.50	3.02	10.51	1.16	POLYCOM	0019	-05
209	148	1.30	4.30	3.05	10.46	1.17	POLYCOM	0020	-05
296	209	1.20	4.25	5.87	10.03	1.22	POLYCOM	0021	-05
296	209	1.00	3.25	4.53	9.59	1.28	POLYCOM	0022	-05
420	296	1.50	5.60	3.65	8.17	1.50	POLYCOM	0023	-05
420	296	1.20	4.50	4.63	8.03	1.52	POLYCOM	0024	-05
590	420	1.30	4.65	4.97	6.92	1.77	POLYCOM	0025	-05
590	420	1.10	3.60	4.04	6.57	1.86	POLYCOM	0026	-05
840	590	1.65	6.00	4.71	6.34	1.93	POLYCOM	0027	-05
840	590	1.40	4.75	4.46	6.07	2.02	POLYCOM	0028	-05
1180	840	1.40	5.10	4.61	5.71	2.14	POLYCOM	0029	-05
1180	840	1.10	3.75	5.19	5.78	2.12	POLYCOM	0030	-05
1670	1180	1.80	6.40	4.87	5.31	2.24	POLYCOM	0031	-05
1670	1180	1.50	5.00	5.45	5.40	2.20	POLYCOM	0032	-05
2370	1670	1.80	5.50	5.49	4.98	2.39	POLYCOM	0033	-05
2370	1670	1.40	4.00	5.93	4.82	2.46	POLYCOM	0034	-05
3350	2370	2.30	7.00	5.24	4.54	2.62	POLYCOM	0035	-05
3350	2370	2.00	5.50	5.77	4.54	2.62	POLYCOM	0036	-05
4000	3350	1.80	5.50	5.95	4.70	2.53	POLYCOM	0037	-05
4000	3350	1.70	4.30	6.02	4.53	2.62	POLYCOM	0038	-05

#### 4 CÁLCULO DOS PARÂMETROS DO MODELO

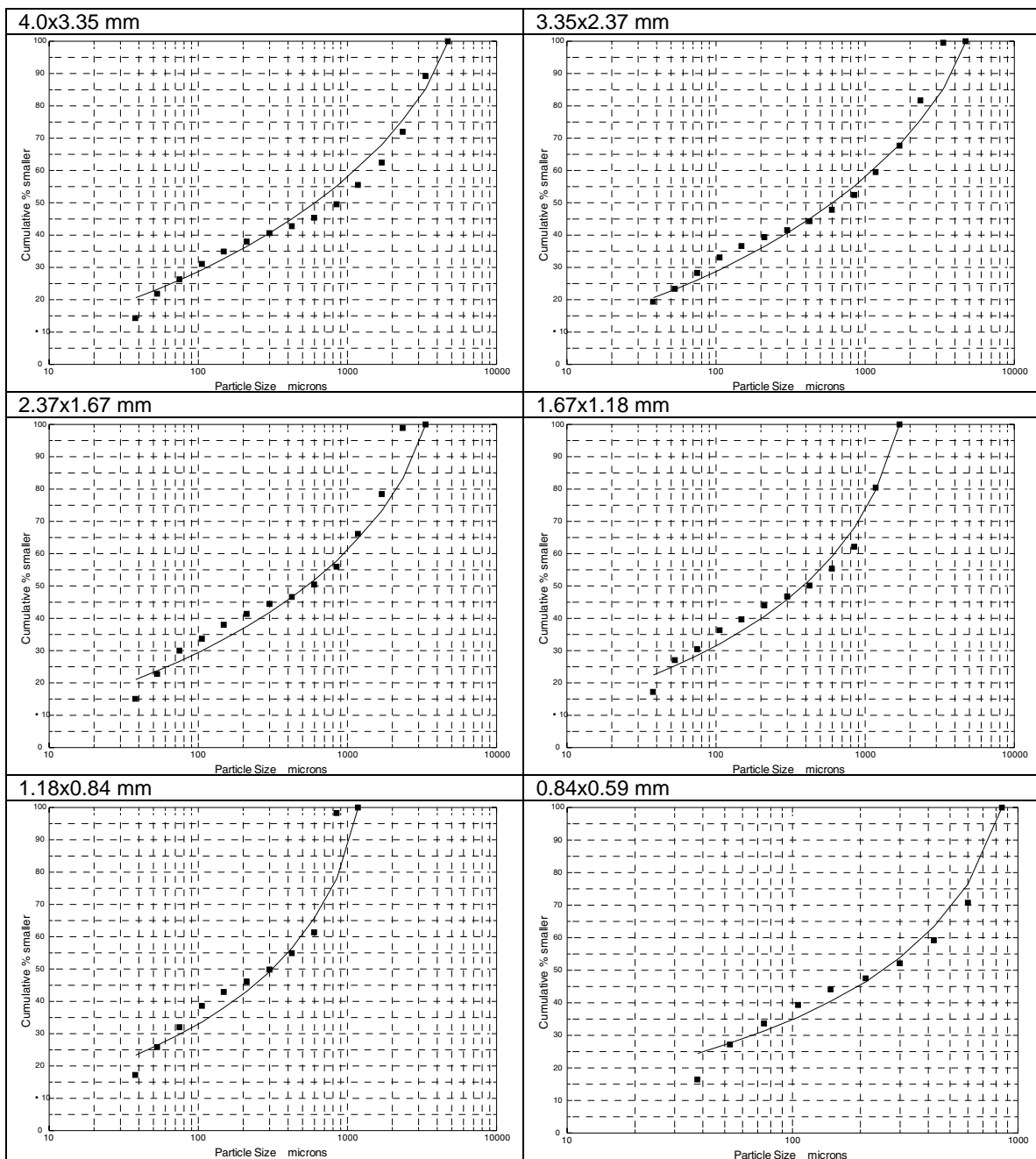
Com as distribuições de tamanhos medidas nos ensaios, os dados de distribuição granulométrica correspondentes podem ser utilizados nos aplicativos desenvolvidos neste trabalho para o cálculo dos parâmetros do modelo proposto. Primeiramente, os resultados dos experimentos de estorço, no britador de rolos, são utilizados para o cálculo dos parâmetros da equação (10). Com estes parâmetros, os dados de distribuição granulométrica dos testes de prensagem no HPGR de bancada, juntamente com os parâmetros de estorço são utilizados para o cálculo dos parâmetros das equações (8), (9) e (11). Os resultados são sumarizados a seguir.

**Tabela 3** Resultados do cálculo dos parâmetros de modelo para os dados da amostra de itabirito compacto testadas.

Função	Parâmetro	Valor	Unidade
Quebra, estorço	$\gamma$	0.5	adimensional
	$\beta$	5.0	adimensional
	$\phi$	0.5	adimensional
Seleção, estorço	$\mu$	2.0	adimensional
	$\lambda$	6.7	adimensional
Quebra, compressão	$\gamma'$	0.553	adimensional
	$\beta'$	5.47	adimensional
	$\phi'$	0.27	adimensional
Seleção, compressão	$\kappa$	57.59	mm
	$\alpha$	0.064	adimensional

Deve-se frisar que rotinas de otimização com modelos complexos como este não podem ser relegadas simplesmente como uma usina de resultados. Uma análise prévia, mais cuidadosa dos dados, indica que nos testes realizados, o vão operacional sempre foi maior do que o maior tamanho de partícula da alimentação. Isso significa que parâmetros de estorço não podem ser obtidos diretamente de resultados de testes de prensagem, como este, e que testes específicos de estorço devem ser conduzidos. Isso é importante porque no moinho industrial, partículas maiores que o vão operacional poderão ser alimentadas, e esta situação só pode ser simulada (ou escalonada) com parâmetros de estorço válidos.

A Figura 5 ilustra os resultados da otimização simultânea para os parâmetros da Tabela 3. Todos os resultados são interpolados com este jogo de parâmetros, com uma qualidade de interpolação similar aos gráficos da figura.



**Figura 5** Interpolando os dados de prensagem com amostras de Itabirito compacto em vários tamanhos de alimentação com os dados da Tabela 3. A qualidade dos resultados pode ser considerada como de boa qualidade.

## 5 METODOLOGIA DE ESCALONAMENTO DE PRAP

As variáveis de escalonamento são duas: velocidade periférica dos rolos e pressão de moagem. Sempre é bom lembrar que a pressão de moagem operacional é diferente (maior) que a pressão de óleo inicial, já que os cilindros se movem comprimindo o óleo e o nitrogênio. Além disso, a pressão de moagem no cilindro é diferente da pressão desenvolvida nos cilindros, e varia de equipamento para equipamento. A fórmula de escalonamento é aplicada pela pressão de moagem efetiva.

O escalonamento é feito a partir de uma relação entre os parâmetros do moinho de teste e do moinho industrial. A fórmula proposta neste trabalho é

$$k^I = k^T \left( \frac{P^T}{P^I} \right)^\xi \left( \frac{v^I}{v^T} \right)^\zeta \quad (14)$$

onde o índice  $I$  se refere ao parâmetro de moinho de industrial e  $T$  se refere aos parâmetros do moinho teste (bancada).  $P$  é a pressão efetiva de moagem, MPascal, e  $v$  é a velocidade periférica dos rolos, em m/s. A medida que  $\kappa$  aumenta, o produto da moagem torna-se mais grosseiro. Assim, quanto maior a pressão de moagem efetiva no moinho industrial, mais fino será o produto, e, em contrapartida, quanto maior a velocidade periférica dos rolos no moinho industrial, mais grosseiro será o produto. O efeito da velocidade periférica dos rolos é bastante menor do que o efeito da pressão de moagem. Os parâmetros  $\xi$  e  $\zeta$  são característicos de cada material. Outro aspecto importante é a existência de uma pressão crítica, a partir da qual o valor de  $\kappa$  permanece constante, ou seja, um aumento da pressão de moagem não produz uma diminuição correspondente na granulagem do produto. Assim, a equação (14) deve ser aplicada com o valor da pressão crítica para pressões operacionais maiores. O efeito da velocidade periférica dos rolos está relacionado também à capacidade do moinho. Aumentando-se a capacidade por aumentar a velocidade periférica dos rolos causa um aumento na granulometria do produto. Este esquema de escalonamento foi testado com o moinho piloto de Vitória, uma prensa KHD. Os resultados são apresentados abaixo.

## 6 ENSAIO DE HPGR PILOTO

A rotina de escalonamento para PRAP industrial deve ser testada contra dados de uma operação de moagem em escala industrial. Para tanto, uma amostra de 20 toneladas de Itabirito duro foi britada abaixo de 32 mm no CDM, e enviada para Vitória para testes na PRAP piloto KHD. Este equipamento é mostrado na Figura 6.

É importante notar que para testes de curta duração, como estes, a produção em toneladas por hora não deve ser medida com balança integralizadora na correia de produto. O procedimento adotado foi coletar todo o produto dos testes na caçamba de uma carregadeira Caterpillar 466. Assim, todo o produto do teste pode ser pesado para uma medida precisa de produção, e a duração dos testes pode ser inferior a 1 minuto, possibilitando a execução de vários testes em curto período de tempo, com uma quantidade mínima de amostra.

Para que estes testes possam ser executados, o silo de alimentação da prensa piloto deve ser cheio antes da partida do equipamento, e a alimentação do silo deve ser continuada durante a execução do teste de forma a garantir uma alimentação homogênea sob condições constantes.

A pressão inicial de óleo não deve exceder 45 bar. A pressão inicial de nitrogênio deve ser 90% da pressão inicial de óleo. Os testes devem ser filmados para uma medida precisa de duração e do vão entre rolos produzido durante o teste. Se houver formação de *flakes*, a espessura destes deve ser medida. Amostras instantâneas de produto devem ser coletadas pelo menos uma vez durante o teste.

A relação pressão de óleo/pressão de moagem para esta prensa é 1.5.



Figura 6 Prensa piloto KHD em Vitória.

## 7 RESULTADOS

O modelo de escalonamento proposto foi implementado no simulador de plantas Modsim, versão 3.6.17. A interface gráfica para o modelo “HPGR” implementado no simulador é mostrada na Figura 7. Nesta interface são entrados os parâmetros obtidos nos testes em escala de bancada, bem como os parâmetros do moinho de testes e do moinho industrial. Os resultados da simulação com escalonamento são mostrados de forma sumária na Figura 7.

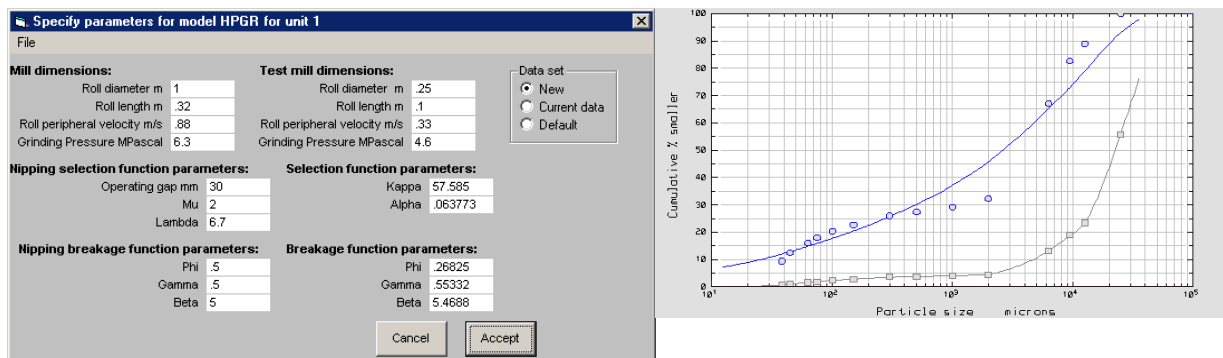


Figura 7 Interface gráfica no Modsim 3.6.17 para escalonamento de moinhos PRAP, mostrando os parâmetros medidos nos testes de bancada e os parâmetros referentes à prensa KHD. À direita distribuições granulométricas medidas na alimentação e no produto da prensa KHD e simulada usando o modelo de escalonamento proposto.

## 8 CONCLUSÕES

A rotina de escalonamento desenvolvida neste trabalho pode ser resumida da seguinte forma:

1. Preparar amostras de mono-tamanho do minério a ser caracterizado para ensaios de compressão em prensa de bancada e de estorço em britador de rolos lisos.
2. Realizar ensaios em britador de rolos lisos ajustando o vão entre rolos para um tamanho igual ao da peneira de fundo da amostra de mono-tamanho. Alimentar o britador lentamente para que as partículas passem pelo vão individualmente. Medir a distribuição de tamanhos em cada produto.
3. Calcular parâmetros para o modelo de estorço (*nipping breakage*).
4. Realizar ensaios de compressão com uma prensa de bancada com amostras de mono-tamanho usando alimentação forçada. Medir pressão de moagem, vão operacional de

moagem, velocidade dos rolos e potência. Medir a distribuição granulométrica gerada em cada produto.

5. Utilizando o aplicativo de otimização, e os parâmetros obtidos em 3, bem como os resultados em 4, determinar parâmetros para quebra por compressão.
6. Utilizando o modelo de escalonamento "HPGR" implementado no Modsim3.6.17, simular uma prensa industrial para uma dada pressão e velocidade de rolos, granulometria da alimentação, diâmetro e comprimento de rolos.

Esta rotina de escalonamento pode ser utilizada para prever a distribuição granulométrica no produto da prensa industrial bem com os parâmetros de consumo de potência e capacidade da prensa industrial.

Como qualquer rotina de caracterização e escalonamento, os modelos deverão ser melhorados em futuros estudos, e a rotina de escalonamento poderá ser simplificada. É sempre aconselhável realizar testes em escala piloto para conferência dos resultados de escalonamento, e refinamento dos parâmetros obtidos em bancada. O sistema de escalonamento obtido foi calibrado para uma única amostra de itabirito compacto, ou semicompacto. Este sistema muito provavelmente não é adequado para outros minérios, e mais estudos deverão ser realizados de forma a produzir um sistema de escalonamento robusto, que possa ser utilizado para qualquer minério.

## REFERÊNCIAS

- 1 Austin, L. G., D. R. V. Orden, *et al.* A PRELIMINARY ANALYSIS OF SMOOTH ROLL CRUSHERS. International Journal of Mineral Processing, v.6, p.321-336. 1980.
- 2 \_\_\_\_\_. Breakage Parameters of some Materials in Smooth Roll Crushers. Powder Technology, v.28, p.245-251. 1981.
- 3 Austin, L. G., M. P. Trubelja, *et al.* Capacity of High Pressure Grinding Rolls. Minerals and Metallurgical Processing, v.12, n.2, May, p.65-73. 1995.
- 4 Austin, L. G., K. R. Weller, *et al.* Phenomenological Modelling of the High Pressure Grinding Rolls. XVIII International Mineral Processing Congress. Sydney, Australia. 1: 87-95 p. 1993.
- 5 Kellerwessel, H. e G. Oberheuser. SCALE UP OF ROLLER PRESSES. XIX International Mineral Processing Congress. San Francisco, U.S.A.: SME - Society for Mining, Metallurgy and Exploration, Inc. 1: 67-70 p. 1995.