

## **ESTADO DA ARTE ENVOLVENDO AS TECNOLOGIAS UTILIZADAS PARA O DIMENSIONAMENTO, MODELAGEM, SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS DE FRAGMENTAÇÃO**

**R. GALERY<sup>(1)</sup>; V.K. ALVES<sup>(2)</sup>; L.C.M. MONTENEGRO<sup>(1)</sup>; A E. C. PERES<sup>(1)</sup>**

(1) Departamento de Engenharia de Minas da UFMG – Rua Espírito Santo, 35 s/702  
30160-030 Belo Horizonte, MG- Brasil

[rgalery@demin.ufmg.br](mailto:rgalery@demin.ufmg.br); [lcmm@demin.ufmg.br](mailto:lcmm@demin.ufmg.br); [aceperes@demet.ufmg.br](mailto:aceperes@demet.ufmg.br)

(2) Centro de Desenvolvimento Mineral – Companhia Vale do Rio Doce – ROD.BR-262 - KM 296 STA LUZIA – MG  
[vladmir.alves@cvrld.com.br](mailto:vladmir.alves@cvrld.com.br)

Na prática da teoria moderna de fragmentação a definição de um circuito eficiente requer a utilização de modelos matemáticos como ferramentas de simulação dos processos de quebra. Simuladores baseados no modelo de balanço populacional – MBP- têm sido empregados com muito sucesso nessas situações. O emprego do MBP requer a determinação dos parâmetros característicos da quebra de um minério específico. Metodologias que têm se tornado cada vez mais importantes proporcionando confiabilidade na aplicação do MBP são aquelas que utilizam técnicas que associem a energia de impacto aplicada a partículas de um determinado tamanho, com a distribuição final dos fragmentos resultantes da quebra. Essas técnicas permitem prever, por simulação, diferentes condições operacionais de moagem, seja na moagem de bolas, de barras, na moagem autógena ou semi-autógena. O presente trabalho tem como objetivo discutir o emprego destes modelos, as técnicas utilizadas para a determinação de parâmetros e utilização desses modelos e técnicas na aplicação em simulação e otimização de circuitos industriais de moagem de minérios.

**Palavras-Chave**, fragmentação, modelagem, simulação, e otimização de processos.

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com Silva, (1973) a fragmentação que alguns chamam cominuição abrange o conjunto de operações que realizam o fraturamento do material, minério, desde os tamanhos maiores que são arrancados, até os menores exigidos pela liberação. O estágio inicial da fragmentação envolve o processamento de grandes volumes de minério, os ROM's ou "Run-of-Mine", provenientes das frentes de lavra. As máquinas primárias que atuam nos primeiros estágios de fragmentação são caracterizadas por serem indispensáveis. Elas, em geral, não realizam nem a redução de tamanho necessária para se atingir a liberação das partículas, nem propiciam adequações granulométricas satisfatórias. Com relação às etapas finais de fragmentação, elas são ineficientes e apresentam um grande consumo energético. Por isso, a fragmentação vem sendo uma preocupação constante do mundo científico e tecnológico. Inúmeros estudos e pesquisas têm sido realizados para se estabelecer o conhecimento destas relações de energia no fenômeno de fragmentação.

A cominuição tem sido analisada segundo três princípios que são úteis para a avaliação de dados resultantes de processos de britagem ou moagem. O *primeiro princípio* diz que para realizar a redução de tamanho é necessário fornecer certa quantidade de energia ( $E_i$ ) e que toda partícula antes de ser fragmentada apresenta certo "estado energético", ( $E_p$ ) diferente do "estado energético" do produto da fragmentação ( $E_f$ ). De acordo com o *primeiro princípio* a energia de fragmentação pode ser obtida através da seguinte expressão:  $E_c = E_p - E_f$ . O *segundo princípio* diz que o trabalho útil requerido na fragmentação, seja por britagem ou moagem é proporcional ao comprimento da trinca gerada, ou seja, ao comprimento da nova superfície formada pelo trabalho de fragmentação. O segundo princípio estabelece a relação entre o número de regiões de fraqueza pré-existente no minério e a fragmentação. Neste sentido uma região de fraqueza é definida como aquela que pode provocar uma falha na estrutura do minério através do qual uma trinca pode ser gerada. Trincas estão sempre presentes em minérios granulados o que pode ocasionar uma variação muito grande no trabalho necessário para realizar a fragmentação. O *terceiro princípio* estabelece uma relação entre as fraquezas estruturais pré-existentes no minério e o trabalho de fragmentação. Neste sentido uma fraqueza estrutural é considerada como sendo um defeito na estrutura do qual uma trinca pode ser gerada. Trincas se acham distribuídas randomicamente nos minérios granulados o que pode ocasionar uma variação muito grande no trabalho necessário para realizar a fragmentação. O número médio de trincas presentes num minério pode, também, definir a distribuição granulométrica do produto de fragmentação. O presente trabalho discute a utilização dos três princípios e a tecnologia desenvolvida que atualmente está sendo aplicada na determinação de importantes parâmetros utilizados no dimensionamento, simulação e otimização de processos industriais de fragmentação de minérios.

## 2. ASPECTOS ENERGÉTICOS DA FRAGMENTAÇÃO

O conhecimento das relações de energia no fenômeno de fragmentação tem sido uma preocupação constante de muitos pesquisadores. Diferentes formulações matemáticas, empíricas, têm sido propostas para correlacionar a resistência que partículas de composição, tamanho e formas diferentes apresentam à compressão. Entretanto, tais índices não têm apresentado nenhuma relação com a fragmentação industrial visto que esta se realiza em máquinas onde milhares de partículas estão presentes. Na fragmentação industrial a redução de tamanho das partículas não é um fenômeno isolado. No interior das máquinas de fragmentação ocorrem outros fenômenos que, de maneira caótica, contribuem para a dissipação da energia de fragmentação. Podemos citar diversos tipos de dissipação de energia como, por exemplo, a deformação, o atrito e até mesmo o ruído.

Até hoje não foi possível isolar e quantificar essas diferentes parcelas de energia presentes no processo de fragmentação. Tem sido preferível correlacioná-las, todas, num único índice que, de preferência, faça referência às dimensões das partículas minerais. Partindo desses princípios, algumas teorias foram propostas sendo a mais antiga delas, a 1ª. Lei da Cominuição a proposta por Rittinger, (1867) que se relaciona diretamente com o segundo princípio da cominuição e postula: "*O trabalho necessário para realizar a fragmentação é proporcional à superfície nova nela gerada.*".

Dessa forma, consideremos um cubo de lado  $D$ , que seja fragmentado em pequenos cubos de lado  $d$ . A superfície inicial ( $S_0$ ) pode ser calculada como sendo  $S_0 = 6D^2$ . A superfície de cada cubinho é  $6d^2$ ; mas como se geraram  $(D/d)^3$  cubinhos, a superfície final é  $S_f = 6d^2(D/d)^3 = 6D^2(D/d)$ . A superfície gerada pela fragmentação é:  $S_f - S_0 = 6D^2(D/d) - 6D^2 = S_0(D/d - 1)$ .

Tem sido usual considerar como "superfície nova" a metade desta, sob alegação de que em cada fratura geram-se duas superfícies. Então a expressão da lei de Rittinger é:

$$E = E_0 \frac{S_0}{2} (D/d - 1) = 3E_0 D^3 (D/d - 1) = 3E_0 D^3 \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D}\right) \quad \text{ou, ainda :} \quad E_v = 3E_{0v} \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D}\right) \quad (1)$$

Na equação (1)  $E_v$  é a energia dada por unidade de volume. Na qual  $E_{0v}$  é o coeficiente unitário de trabalho. Nesta dedução é introduzida a relação de redução  $K=D/d$ .

A lei de Rittinger foi seguida pela segunda lei, com o trabalho de Kick, (1885) cujo postulado é o seguinte: "O trabalho necessário para produzir mudanças análogas na configuração de corpos geometricamente semelhantes e do mesmo estado tecnológico é proporcional ao volume ou peso dos corpos".

Sendo  $J$  um coeficiente de proporcionalidade energético, a lei de Kick terá a seguinte tradução analítica:

$$E = J \left(\frac{V_0}{V_n}\right) = JN \quad (2) \quad N = \frac{V_0}{V_n} = \left(\frac{V_0}{V_1} \frac{V_1}{V_2} \frac{V_2}{V_3} \dots \frac{V_{n-1}}{V_n}\right) = N_0^n \quad (3)$$

onde  $N_0$  é o grau de redução volumétrico unitário. Se  $J_0$  é o trabalho relativo a este grau de redução unitário, podemos escrever também que o trabalho total é o produto de  $n$  vezes o trabalho unitário  $J_0$ . Ou seja,  $E = nJ_0$ . Tirando o valor de  $n$  da relação segue que a equação (7) é a forma usual de expressar a lei de Kick.

$$N = N_0^n \quad (4) \quad \log N = n \log N_0 \quad (5) \quad E = J_0 \frac{\log N}{\log N_0} \quad (6) \quad E = K \frac{\log D}{\log d} \quad (7)$$

Blanc, (1957), realizando estudos sobre as leis até então conhecidas - a de Rittinger e a de Kick - mostrou que as duas leis não se sobrepujam, mas se aplicavam a faixas diferentes de granulometria: a de Kick à faixa granulométrica mais grossa e a de Rittinger à faixa fina. Constatou, também, que entre ambas havia uma faixa intermediária, para a qual não encontrou nenhuma expressão analítica. Bond, (1952), supriu a lacuna apontada por Blanc formulando a *Terceira Lei da Cominuição* ou lei intermediária, com nítida referência às outras duas: "O trabalho dispendido por unidade de volume ou de peso é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho".

A tradução imediata da lei de Bond, para uma redução do tamanho  $D$  para o tamanho  $d$  é:

$$E = E_0 \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}}\right) \quad (8)$$

Bond convencionou que os tamanhos  $D$  e  $d$  fossem dados em micrometros e referidos como sendo os tamanhos das malhas que deixam passar, respectivamente 80% da massa da alimentação e do produto. Por outro lado, propôs que o coeficiente de trabalho fosse chamado de "work index" ( $W_i$ ) definido como o trabalho necessário para reduzir a unidade de peso (tonelada curta = 907 kg) do material considerado, desde um tamanho inicial infinito ( $D=\infty$ ) até o tamanho final  $d = 100 \mu\text{m}$ . A expressão deste "work index" resulta da aplicação da fórmula de Bond ao caso definido, considerando que a quantidade de energia  $E$  que se refere a volume, seja transformada em massa, mediante divisão pela densidade ( $\delta$ ) do material tem-se, então:

$$W_i = \frac{E_v}{\delta} = \frac{E_0}{\delta} \left(\frac{1}{\sqrt{100}} - \frac{1}{\sqrt{\infty}}\right) = \frac{E_0}{\delta} \left(\frac{1}{10} - 0\right) = \frac{E_0}{10\delta} \quad \text{Ou seja: } E_0 = 10\delta W_i \quad (9)$$

Substituindo-se a equação (9) na equação (8) temos a equação (10) que se refere a energia volumétrica  $E_v$ . Dividindo pela massa específica do material ( $\delta$ ), passa a referir-se a peso, assumindo a forma da equação (11) que é a forma da equação de Bond que na prática é mais utilizada.

$$E_v = 10\delta W_i \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}}\right) \quad (10) \quad E_p = 10W_i \left(\frac{1}{\sqrt{d}} - \frac{1}{\sqrt{D}}\right) \quad (11)$$

Finalmente, Charles (1957) estabelece a chamada *Lei Geral da Fragmentação* que engloba as três leis anteriores e é definida pela equação (12).

$$\partial E = -k \frac{\partial d}{d^n} \quad (12)$$

Na equação (12),  $E$  é a energia específica aplicada a uma massa de minério necessária para suprir a energia de superfície de las partículas de diâmetro igual a  $d$ ,  $k$  e  $n$  são constantes que dependem do material. O gráfico da Figura 1 mostra a forma geral apresentada pelas relações envolvendo energia e redução de tamanho onde o expoente  $n$  varia significativamente dentro da ampla faixa de tamanhos de partículas.

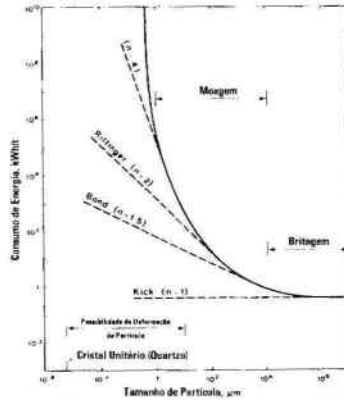


Figura 1: Variação do consumo de energia em função do tamanho de partícula (Hukki, 1961)

A importância do trabalho de Bond para a fragmentação deve ser ressaltada. Ele desenvolveu a metodologia para determinar o índice de trabalho,  $W_i$  para os diferentes tipos de minérios. Ele padronizou para a moagem de barras e de bolas, as dimensões e o número de revoluções dos moinhos de teste, a quantidade em número, a massa aproximada e os diâmetros das barras e das bolas que compunham a carga moedora. No que se refere à granulometria de alimentação, definiu os procedimentos de preparação do minério e de cálculo da massa para testes. Estabeleceu o valor de 250 por cento para a carga circulante a ser atingida em cada teste para a simulação de moagem contínua, em circuito fechado com a malha de abertura  $A_1$  fornecida em micrometros. O índice de trabalho,  $W_i$ , determinado através das equações (13) para a moagem de barras e (14) para a moagem de bolas exigia, também, a determinação do índice de moabilidade do minério,  $G_{pb}$ , definido como a quantidade em gramas de minério moído por revolução ( $g/rpm$ ) quando se atingia a carga circulante específica para cada caso.

**Tabela 1:** Equações de Bond para a Determinação do  $W_i$  teste em moinhos padronizados em escala de laboratório.

$W_{i \text{ teste}}$ para a Moagem de Barras	$W_{i \text{ teste}}$ para a Moagem de Bolas
$W_{i \text{ teste}} = \frac{62,0}{A_1^{0,23} (Gpb)^{0,625} \left[ \frac{10}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{D_{80}}} \right]} \cdot 1,1 \quad (13)$	$W_{i \text{ teste}} = \frac{44,5}{A_1^{0,23} (Gpb)^{0,82} \left[ \frac{10}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{D_{80}}} \right]} \cdot 1,1 \quad (14)$

Nas Equações (13) e (14),  $D_{80}$  e  $d_{80}$  referem-se às aberturas, dadas em micrometros ( $\mu m$ ), que deixam passar respectivamente, 80% por cento da alimentação e do produto de moagem.

### 3. O ESCALONAMENTO DO TRABALHO DE FRAGMENTAÇÃO

O trabalho de Hukki, (1961) foi importante para evidenciar a importância do escalonamento do trabalho de fragmentação enfatizando que leis diferentes são necessárias para interpretar as variações encontradas para o escalonamento da energia de fragmentação de materiais de tamanhos diferentes. Bond observou, também, que um único índice de trabalho,  $W_i$ , não era suficiente para definir as variações de energia para os estágios de britagem, moagem de barras e moagem de bolas. Dessa forma desenvolveu metodologias específicas para a determinação de índices de trabalho diferentes para cada estágio. Para a britagem Bond desenvolveu a primeira célula de impacto simples sobre partículas individuais. Essa célula é apresentada esquematicamente na figura 2. O "work index" para a britagem,  $C_b$ , pode ser calculado através da equação (15) onde  $E_b$  é a energia de Bond para fragmentar uma rocha individual,  $k$  é uma constante cujo valor era igual a 164 para o equipamento em questão e  $\alpha$  é o ângulo que os pêndulos eram posicionados antes do impacto sobre o material de teste. O índice de

fragmentação é calculado, então pela equação (16) onde  $C_{bi}$  é definido como sendo o índice de impacto para a britagem baseado no valor médio observado em testes realizados com 10 a 20 amostras.  $E_b$  é a energia de fragmentação de Bond,  $t$  é a espessura da partícula e  $s.g.$  o peso específico do material testado.

Figura 2: Pêndulo de Impacto de Bond

A energia de britagem de Bond é obtida pela equação (17) onde  $C_b$  é o nível de energia necessário na britagem.  $D_{80}$  e  $d_{80}$  são respectivamente os tamanhos que deixam passar 80% da alimentação e do produto da britagem.

$$E_b = \frac{1}{2} k(1 - \cos \alpha) \quad (15)$$

$$C_{bi} = \frac{2,59 E_b}{s.g. t} \quad (16)$$

$$C_b = \frac{10C_{bi}}{\sqrt{d_{80}}} - \frac{10C_{bi}}{\sqrt{D_{80}}} \quad (17)$$

#### 4. O DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS FENOMENOLÓGICOS

O método de Bond utilizado para o dimensionamento de circuitos de moagem apresenta algumas vantagens: i) é muito simples; ii) a experiência mostra que ele pode fornecer um grau de precisão razoável, pois é baseado em dados experimentais levantados em usinas. Existem, entretanto, dois problemas com relação a utilização do método. A primeira é que o fator de escala da energia específica de fragmentação determinada em circuito fechado na escala de laboratório nem sempre corresponde ao da escala industrial. No que concerne ao estado da arte, tem-se consagrado a Lei de Bond modificada por um produto de 8 (oito) fatores de natureza mecânico-operacional referenciados por Rowland e Kjos, (1975). O modelo não inclui algumas considerações que são obviamente importantes como: i) variações na carga circulante e a eficiência dos classificadores; ii) diferentes combinações de distribuição de tamanhos das bolas; variações no tempo de residência das partículas correlacionadas com a geometria do moinho e a densidade da polpa. Dificuldades foram encontradas, também, na aplicação dessas leis em trabalhos de simulação e otimização de processos industriais.

Nas últimas décadas, outros modelos considerados fenomenológicos ou cinéticos, mais consistentes, foram desenvolvidos. O modelo do balanço populacional (MBP) apresentado por Reid, (1965), descrito pela equação (18) tem sido largamente utilizado para a simulação e otimização e para o dimensionamento de circuitos industriais de moagem.

$$\frac{\partial m_i(t)}{\partial t} = -S_i m_i(t) + \sum_{j=1}^{i-1} h_{ij} S_j m_j(t) \quad (18)$$

O sucesso do modelo do balanço populacional é atribuído ao fato de que cada um dos sub-processos da moagem, isto é, a fragmentação do material, a redistribuição dos fragmentos, o transporte e a classificação de partículas dentro do moinho podem ser representados por equações descritivas de cada um dessas etapas.

O modelo do balanço populacional representado pela equação 18 é fundamentado em dois parâmetros. O primeiro deles é conhecido como a função seleção,  $S_i$ . Esse parâmetro representa a velocidade específica de quebra das partículas de tamanho  $i$  no interior do moinho em função do tempo de moagem  $t$ .

O segundo parâmetro conhecido como função quebra  $h_{ij}$ , representa a distribuição dos fragmentos de tamanho original  $j$  que após sofrer quebra se dirigem para a fração de tamanho  $i$ . Geralmente assume-se que a função quebra é uma característica do material, enquanto a velocidade específica de quebra depende das condições operacionais e do meio de moagem. O

modelo do balanço populacional proporcionou uma metodologia mais confiável para a descrição do processo de quebra. A simulação de processos industriais de moagem dependeu do desenvolvimento de técnicas eficientes para estimar os  $n$  valores ( $i=1,2,3, \dots, n$ ) de cada um dos parâmetros da função seleção  $S_i$  e da função quebra  $h_{ij}$ . Três diferentes grupos de pesquisadores estiveram envolvidos nos avanços alcançados nessa área. O primeiro grupo fundamentado no trabalho de Luckie e Austin (1972) desenvolveu uma série de técnicas combinando resultados de testes de moagem de longa e curta duração, cuidadosamente planejados em laboratório para a determinação dos parâmetros de quebra. Esse grupo baseou seus estudos nos modelos apresentado na Tabela I pela equação (19), para a função quebra e pela equação (20) para a função seleção.

**Tabela II:** Formas funcionais dos parâmetros de quebra associados ao modelo do balanço populacional

Modelo funcional da função quebra	Modelo funcional da função seleção
$B_{ij} = \phi \left( \frac{x_i}{x_j} \right)^\alpha + (1 - \phi) \left( \frac{x_i}{x_j} \right)^\beta$	(19) $S_i = S_1 \left( \frac{x_i}{x_m} \right)^\alpha \left( \frac{1}{1 + \left( \frac{x_i}{x_j} \right)^\lambda} \right)$

O segundo grupo baseado no trabalho de Herbst et al (1973) desenvolveu uma metodologia para estimar parâmetros de quebra utilizando posteriormente um procedimento para o escalonamento da função seleção. Esses estudos eram inicialmente baseados nos modelos fornecidos na Tabela I. O escalonamento ("scale up") dos resultados de laboratório para a escala industrial era baseado na premissa de que a potência  $P$  consumida no eixo pinhão do moinho influenciava de uma forma muito mais acentuada a velocidade específica de quebra  $S_i$ , do que a função quebra  $h_{ij}$ . Nessas premissas estava fundamentada, também, a invariabilidade da função quebra que supostamente era considerada uma característica do minério. O escalonamento da função seleção era obtido associando a potência consumida  $P(kWh)$  e a massa de minérios presente no interior do moinho, o "hold up"  $H$  (em toneladas) conforme apresentado na equação 21.

$$S_i = S_i^E \frac{P}{H} \quad (21)$$

Nessa equação,  $S_i^E$  é a função seleção específica que representaria a constante de proporcionalidade a qual possibilitaria determinar os valores da função seleção para qualquer processo sob investigação uma vez conhecidos os valores de  $P$  e  $H$ . Baseado nesses modelos alguns trabalhos de otimização de circuitos de moagem de minério de ferro foram realizados com sucesso por Galery et al.(1996) e Alves et al.(2004) que utilizaram um moinho dotado com um medidor de torque para a realização das medidas de energia específica de cominuição durante os testes de moagem realizados em laboratório.

Considerando-se a função quebra uma característica de distribuição do material, uma série de estudos foram desenvolvidos para analisar o processo de fragmentação através de impacto simples sobre partícula individuais. Mecanismos do tipo *drop-ball* apresentado em estudos de Paul e Maré (1980) foram aperfeiçoados por outros pesquisadores. Narayanan e Whiten (1988) apresentaram um estudo desenvolvido num sistema de pêndulo duplo que acionado provocava impacto sobre partículas individuais. Eles demonstraram que a distribuição de tamanhos após impacto poderia ser descrito por uma família de curvas denominadas  $t_n$ 's. Essas curvas poderiam ser representadas por um único parâmetro,  $t_{10}$  definido como sendo a fração do material que, após fragmentação, passa por uma abertura equivalente a um décimo (1/10) do tamanho da partícula original. Eles demonstraram, também, que o parâmetro  $t_{10}$  pode se relacionar matematicamente com outros parâmetros  $t_n$ 's ( $n=2, 4, 25, 50$  e  $75$ ) como, por exemplo,  $t_2, t_4, t_{25}, t_{50}$  e  $t_{75}$ , através de modelos envolvendo a energia específica de fragmentação  $E_{cs}$  (kWh/t).

Conforme apresentado esquematicamente na figura 3b, o parâmetro  $t_{10}$  pode se relacionar com outros parâmetros  $t_n$  como, por exemplo,  $t_2, t_4, t_{25}, t_{50}, t_{75}$ , etc. Resultados mostram que o parâmetro  $t_{10}$  está também relacionado com a energia específica de fragmentação  $E_{cs}$ , de acordo com a relação apresentada na equação (22):

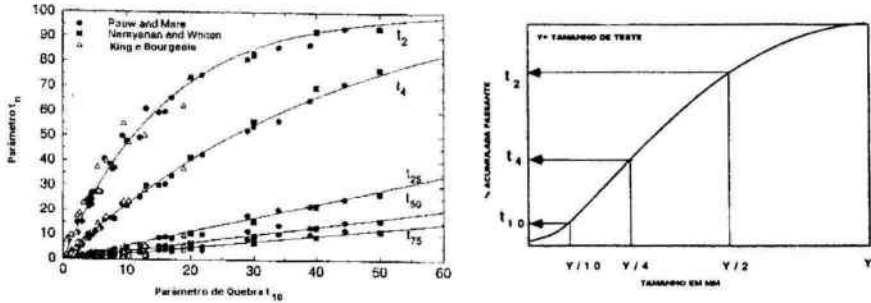


Figura 3: a) Parâmetros  $t_n$  em função do parâmetro  $t_{10}$  b) Interpretação dos parâmetros  $t_n$

Os parâmetros  $A$  e  $b$  da equação (22), determinados através de resultados exemplificado na figura 4, são constantes e  $E_{cs}$  é a energia específica de fragmentação ou energia de impacto. Com o desenvolvimento do processo de moagem autógena (AG) e semi-autógena (SAG) as aplicações do modelos representado pela equação (21) passam a ter significado relativo ao comportamento do minério quando submetido à moagem AG ou SAG.

$$t_{10} = A(1 - \exp(-bE_{cs})) \quad (22)$$

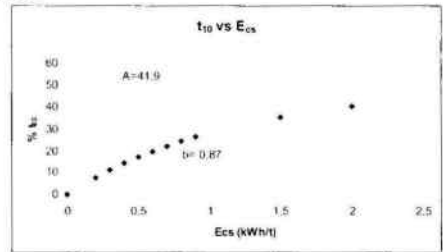


Figura 4: relação de dependência do parâmetro  $t_{10}$  da energia específica de fragmentação  $E_{cs}$  conforme equação (22)

A Tabela III apresenta as relações envolvendo os parâmetros  $Ab$  e sua classificação com relação à resistência a fragmentação. Esses dados em estudos de moagem AG/SAG podem ser complementados com estudos de resistência do minério submetido à ensaios de abrasão por tamboramento.

Tabela III: Classificação da resistência ao impacto em função do parâmetro  $Ab$ .

Intervalo do Parâmetro $Ab$		Resistência ao Impacto
Maior	Menor	
0	9,9	Excepcionalmente Alta
10	19,9	Extremamente Alta
20	29,9	Muito Alta
30	39,9	Alta
40	49,9	Moderadamente Alta
50	59,9	Média
60	69,9	Baixa
70	89,9	Moderadamente Baixa
>	90	Muito Baixa

A importância dos estudos envolvendo impacto simples sobre partículas individuais gerou o desenvolvimento de uma série de equipamentos específicos para a determinação dos parâmetros de quebra utilizados nos modelos empregados para o dimensionamento, simulação e otimização de máquinas e circuitos de cominuição. Partindo do primeiro aparato desenvolvido por Bond, aparece na Austrália o sistema de "pêndulo duplo" dotado de mecanismos próprios para a captação da energia de impacto realizado sobre partículas individuais. Na Universidade de Utah/USA esse sistema foi aperfeiçoado através da "Ultra Fast Load Cell" (UFLC) que tem apresentado resultados bastante precisos de medidas da energia



específica de impacto para diferentes tipos de minerais e rochas. Essas novas tecnologias têm possibilitado o avanço dos estudos em direção ao desenvolvimento de simuladores que integram a energia de impacto que ocorre no interior das máquinas de fragmentação em diferentes níveis. Esses novos simuladores utilizam o Modelo do Elemento Discreto (DEM). Esses modelos se acham ainda numa fase embrionária do seu desenvolvimento uma vez que carecem ainda da utilização intensiva de recursos matemático e computacional. Os estudos de impacto simples sobre partículas individuais têm sido empregados, também, em estudos onde o pré-condicionamento do minério é realizado com explosivos para induzir no minério desmontado, fraquezas estruturais que se apresentam sob a forma de micro-fissuras induzidas pelo explosivo.

#### 4. CONCLUSÕES

O presente trabalho buscou avaliar o estado da arte e os desenvolvimentos associados à tecnologia disponível para o dimensionamento de equipamentos e circuitos de fragmentação, sua modelagem, simulação e otimização. Depois de Bond, o Modelo do Balanço Populacional tem se mostrado uma das metodologias mais utilizadas na simulação, otimização e no dimensionamento de equipamentos de fragmentação. Grande avanço nessa área se acha associado a utilização de mecanismos de impacto simples sobre partículas individuais. Essas novas ferramentas são utilizadas para a determinação de parâmetros de quebra dos principais modelos utilizados na simulação e otimização de processos industriais de fragmentação.

#### 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, V.K., Galéry, R., Peres, E.C., Schneider, C.L., Estudo da otimização da carga de moinho utilizando tecnologia de simulação, XXENTMME, Florianópolis, 2004.
- Blanc, C., *Révue de L'Industrie Minérale*, vol.3, (1937).
- Charles, R.J., *Energy-Size Reduction Relationships in Comminution*. Trans. AIME/SME, 1957, 208, p. 80-88.
- Galéry R., Montenegro, L. C. M., Horta, R. M., Maia, G. S., Estudo de otimização da distribuição da carga de bolas na moagem do minério de ferro itabirítico de timbopeba/CVRD. II Simpósio brasileiro de Minério de ferro, p.130-143., Ouro Preto, 1996.
- Herbst, J. A., Fuerstenau, D. W., *Mathematical Simulation of Dry Ball Milling Using Specific Power Information* Trans. AIME/SME, vol. 254, 1973, p. 343-348.
- Hukki, R.T., *Proposal of a Solomonic Settlement Between the Theories of von Rittinger, Kick and Bond*, Trans. AIME/SME, vol. 220, 12961, p. 403-408.
- Kick, F.; *Das Gesetz der proportionalem Widersrtand und Sciene Anwerdung*. Leipzig, 1885.
- King, R. P. and Bourgeois, F., *A new conceptual model for ball milling*, XVIII IMPC, p. 81-86 Sydney, 1996.
- Luckie, P. T., Austin, L.G., *A review introduction to the solution of the grinding equations by digital computation*, *Minerals Science Engineering*, vol. 4, No.2, p.24-37, 1972.
- Naranayan, S. S., and Whiten, W.J., *Determination of comminution characteristics from single particle breakage tests and its application in ball mill scale-up*, *Transactions of The Institute of Mining and Metallurgy*, C.97, 1988.
- Paul, O. G. and Maré, M. S., *The determination of optimum impact – breakage routes for an ore*, *Powder Technology*, no. 54, p.3-13, 1988.
- Reid, K. J., "A Solution to the Batch Grinding Equation." *Chem. Eng. Sci.*, vol. 29, 1974, pp.589-599.
- Silva, A. T. ; *Tratamento de Minérios* vol. I. ed. Cotec, Belo Horizonte, 1973.
- von Rittinger, P. R., *Lehrbuch der Aufbereitungskune*, Berlin, 1867.