

# COMINUIÇÃO DE PARTÍCULAS MÚTIPLAS DO FELDSPATO UTILIZANDO UM MOINHO ELETROMECHANICO

B.B. Lira<sup>1</sup> B.H.M.Nóbrega<sup>2</sup>

1 – Departamento de Engenharia de Minas – Universidade Federal de Pernambuco. Rua acadêmico Helio Ramos, s/n. Cidade Universitária. CEP 50.440-530. Recife-PE  
Email: lira@secrel.com.br

2 – Tecbrite Tecnologia em Britagem. BR 222, KM 27, s/n. Guararu. CEP xx.xxx-xxx. Caucaia-Ce  
Email: benhurnmo@hotmail.com

## RESUMO

O feldspato é um dos materiais que fazem parte da composição da barbotina para produção de produtos cerâmicos. Informações sobre as características de fragmentação deste mineral são relevantes na moagem dos materiais cerâmicos, para que o processo de produção de pisos e revestimento cerâmicos não conduza a formação de micro-fraturas ou superfícies distorcidas como consequência do produto de moagem. A indústria requer modelos matemáticos de moagem que incorporem as características de fragmentação dos componentes da massa cerâmica.

Na moagem dos materiais cerâmicos não há uma predominância dos mecanismos de fragmentação e sim uma combinação de impacto, compressão e abrasão. Nestes casos a cominuição em laboratório para determinar as características de fragmentação do minério devem envolver testes com partículas múltiplas. Neste trabalho apresentamos uma técnica de fragmentação múltiplas de partículas minerais em laboratório.

Os ensaios foram conduzidos com um moinho eletromecânico e o feldspato como o mineral a ser moído. Os resultados da cominuição apresentaram um comportamento similar aos obtidos na moagem das partículas com o duplo pendulo. A família de curvas observada e a correlação entre energia específica de cominuição e fragmentação seguiram as correlações estabelecidas nos ensaios de cominuição com partículas unitária.

Palavras chave – Moagem, Feldspato, Fragmentação, Cerâmica.

## 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os profissionais do setor mineral, têm direcionado esforços com o objetivo de aumentar a produção, a recuperação do minério e minimizar os custos operacionais. Os resultados vêm sendo conseguidos devido ao desenvolvimento na área da informática, programação científica e instrumentação, sendo ferramentas eficazes na automação industrial, controle e otimização de processos.

No setor mineral e na indústria cerâmica, a maior parte da energia consumida no beneficiamento dos minérios é absorvida pela operação de cominuição. O custo operacional no processamento mineral depende desta operação e, portanto, a sua otimização constitui um constante desafio aos engenheiros de processos.

Devido à complexidade dos processos de cominuição, modelos matemáticos têm sido propostos com o objetivo de descrever o comportamento da fragmentação nos equipamentos de britagem e moagem. Esses modelos necessitam serem ajustados com parâmetros que podem ser determinados em laboratório, e através da interação matemática e relações empíricas.

Um moinho eletro mecânico foi utilizado nos ensaios de moagem em laboratório com partículas múltiplas. A partir deste testes uma correlação entre energia específica de cominuição e a resistência à fragmentação das partículas foi determinada, tendo como base equações definidas nos ensaios de fragmentação de partículas unitárias no duplo pêndulo Lira, 1990; Naraynan, 1986/88. Os resultados dos ensaios de cominuição no moinho eletromecânico fornecem informações sobre as características de fragmentação do mineral para serem incorporadas aos modelos matemáticos dos moinhos de bolas. No presente trabalho utilizamos o feldspato nos ensaios de moagem. Estas informações são requeridas nos modelos matemáticos de moagem. Ainda neste trabalho, o “Perfect Mixing Model PMM”, desenvolvido por Whiten (76/74/71), foi ajustado para modelar o moinho de Bond, incorporando correlações estabelecidas nos ensaios de fragmentação com partículas unitárias e múltiplas.

## 2. DUPLO PÊNDULO (FRAGMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS UNITÁRIAS)

### 2.1. Família de curvas

A distribuição granulométrica resultante da fragmentação de partículas a vários níveis de energia pode ser definida por uma família de curvas (Narayanan e Whiten, 1988; Leung, 1987; Lira, 1990). Nesta família de curvas, o parâmetro “tn” é a percentagem acumulada passante em 1/n do tamanho inicial das partículas. A figura 1 mostra a família de curvas encontrada por Lira 1990, para os testes de fragmentação com 87 (oitenta e sete) minérios usando o duplo pêndulo.

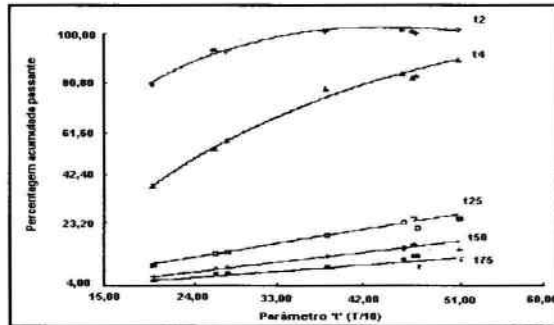


Figura 1 – Relação entre os parâmetros “t” e “t2”, “t4”, “t25”, “t50” e “t75” Lira (1990)

Em testes realizados com fragmentação de partículas unitárias utilizando o duplo pêndulo, foram estabelecidas relações entre energia específica de cominuição e o parâmetro “t” (Narayanan e Whiten, 1988, Leung, 1987; Lira 1990). Uma destas relações proposta por Lira (1990) é a seguinte:

$$t = a (1 - \text{Exp}(-b \text{Ecs}))$$

Eq. 1

Os parâmetros da correlação acima para o minério de cobre da mina de Woodlawn – Austrália é apresentado na Figura 2. Verifica-se que nos níveis de energia abaixo de um quilowatts hora, há uma correlação linear entre fragmentação e energia de cominuição. Acima deste valor esta proporcionalidade não se verifica provavelmente devido a maior resistência a fragmentação das partículas finas.

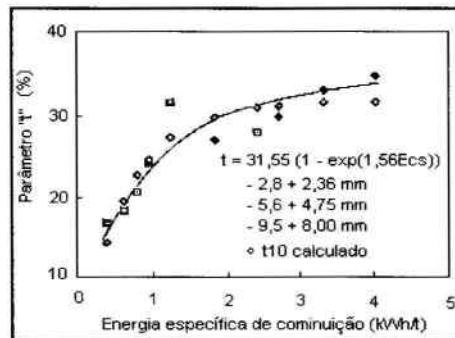


Figura 2 – Relação entre energia específica de cominuição e parâmetro “t” dos ensaios com um minério de cobre (Lira, 1985).

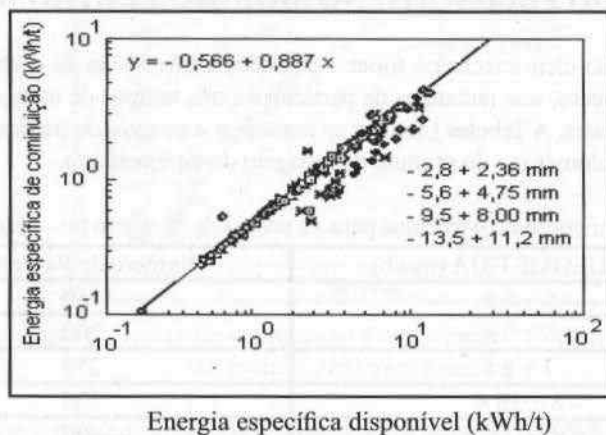
### 2.2. Relação entre energia específica disponível e energia específica de cominuição

Narayanan (1986/88) e Lira (1987/92) usaram a seguinte equação para relacionar energia específica de cominuição “Ecs” e disponível “Eis” para fragmentação nos testes com o duplo pêndulo:

$$\text{Ecs} = m + n \text{Eis}$$

Eq. 2

onde m e n são constantes. A figura 3 mostra a relação entre estas energias nos testes conduzidos por Narayanan (1985) e Lira (1990) para 87 (oitenta e sete) tipos de minérios em escala logarítmica. Os tamanhos das partículas utilizados foram entre – 2,80 + 2,36 mm à –13,20 + 11,2 mm. A regressão linear da correlação da Figura 3 apresentou um nível de significância de 99,99%.

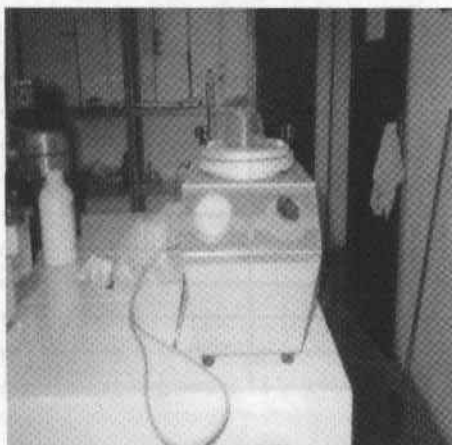


**Figura 3** – Relação entre a energia específica disponível e a energia específica de cominuição nos testes no duplo pendulo (Lira (1990))

### 3. MOINHO ELETROMECÂNICO (FRAGMENTAÇÃO DE PARTÍCULAS MULTIPLAS)

O equipamento consiste de uma bola de porcelana que vibra sobre uma concha também de porcelana que lhe transmite esta vibração. Nesta peça, coloca-se o material que se deseja fragmentar. O equipamento possui dezoito níveis de vibração ajustáveis. Entretanto neste trabalho utilizamos apenas três níveis de vibração no qual calculamos a potência nesses níveis. Com posse desta potência, massa da alimentação e do tempo de moagem dos testes, consegue-se relacionar a energia de específica disponível (kWh/t) com a energia específica de cominuição assumindo que as partículas fragmentam-se de uma maneira similar e portanto incorporamos a correlação apresentada na Figura 3, isto é a energia absorvida no processo de moagem é proporcional a energia específica disponível. Uma fotografia do moinho eletromecânico é apresentado na Figura 4. O equipamento é de fácil manuseio, possui operação simples e possibilita realizar ensaios controlado de moagem em laboratório com partículas múltiplas.

No Moinho eletromecânico a predominância dos mecanismos de fragmentação, ocorre de acordo com a intensidade da energia isto é, os mecanismos de fragmentação dos moinhos de bolas tais como, impacto, abrasão e compressão. Entretanto, para baixos níveis de energia há predominância da fragmentação por abrasão e para altos valores de energia predomina o impacto. Verificando que todos os mecanismos de fragmentação estão presentes no moinho eletromecânico e a facilidade de ensaios com partículas múltiplas permitiram determinar as características de cominuição de um determinado minério que no caso deste trabalho foi feldspato visto que, este apresenta uma maior resistência a fragmentação juntamente com a sílica nos componentes minerais que compõem a barbotina nos processo de fabricação dos revestimentos cerâmicos.



**Figura 4** – Moinho eletromecânico

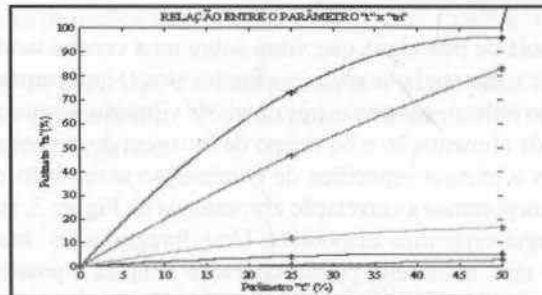
#### 4. A FRAGMENTAÇÃO DO FELDSPATO NO MOINHO ELETROMECHANICO

Os ensaios de moagem no Moinho eletromecânico foram realizados a três níveis de energias, correspondente aos três ajustes nas vibrações do equipamento, seis tamanhos de partículas e três tempos de moagem 5, 10 e 15 perfazendo um total de 54 (cinquenta e quatro) testes. A Tabela I mostra os tamanhos e numero de partículas para cada teste e a Tabela II mostra uma típica análise granulométrico do produto de moagem do equipamento.

**Tabela I** – Tamanho e numero de partículas para os ensaio de moagem no moinho eletromecânico

GRANULOMETRIA (mesh)	Numero de Partículas
- 5 + 6 #	150
- 6 + 7 #	200
- 7 + 8 #	250
- 8 + 10 #	300
- 10 + 14 #	400
- 14 + 20 #	800

A Figura 5 mostra a família de curvas resultante dos cinquenta e quatro ensaios de moagem no equipamento eletromecânico e utilizando um total de 16.900 (dezesesse mil e novecentas) partículas de feldspato. O numero de partículas aumenta com a granulometria, conforme se mostra na tabela I, para manter uma massa aproximadamente constante.



**Figura 5** – Família de curvas encontrada a partir ensaios realizados com o moinho eletromecânico.

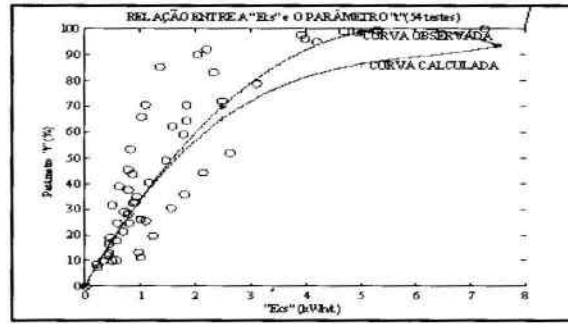
O resultado observado na figura 5 é semelhante ao encontrado por Lira 1990 (Figura 1), o que indica que os minérios fragmentam-se de uma maneira similar. Esta família de curvas foi estabelecida com as amostras testadas e usando uma regressão cúbica spline (Whiten, 1971) com nós fixados em 0; 25 e 50 para o parâmetro "t".

**Tabela II** - Análise granulométrica do produto de moagem no equipamento eletromecânico na fração granulométrica -10+14# e um tempo de moagem de 15min.

Granulometria (mesh)	% acumulada passante
-20 + 32	97,9100
- 32 + 48	95,8719
- 48 + 65	75,4169
- 65 + 100	57,1006
- 100 + 150	40,0487
- 150 + 200	30,8249
- 200 + 270	22,8735
- 270 + 325	15,7845
- 325 + 400	12,3783
- 400 + 500	8,7195

A correlação entre energia específica disponível e cominuição, testada para diversos minérios no pêndulo, foi utilizada para o calculo da energia específica de cominuição dos ensaios realizados no moinho eletromecânico. A partir da equação proposta por Lira – 1990, relacionamos o parâmetro "t" com a energia específica de cominuição nos testes com o moinho eletromecânico.

Partindo da equação 1 e ajustando os parâmetros a e b através do método dos mínimos quadrados determinamos os parâmetros da equação que correlaciona a energia específica de cominuição com o parâmetro "t", nos testes conduzidos com o moinho eletromecânico. A Figura 6 descreve esta correlação observada e a calculada utilizando a equação 1.



**Figura 6** – Relação entre a energia específica de cominuição e o parâmetro “t” para os testes de moagem do feldspato no moinho eletromecânico.

A Figura 6 mostra uma proporcionalidade até o nível da energia em torno de 1,5 kWh/t. A partir deste nível a obliquidade da curva é acentuada. Isto pode ser devido à provável mudança nos mecanismos de fragmentação. Estes resultados são semelhantes aos encontrados por Lira, 1994/90/85 nos ensaios com partículas unitárias, conforme pode ser observado na Figura 2.

Para determinação da função de fragmentação, iniciamos com um valor da energia específica de cominuição e conseqüentemente o parâmetro “t”, que ao ser lançado na família de curvas (Figura 5) resulta na distribuição granulométrica na qual pode ser estabelecida a função de fragmentação. Utilizando os dados da Tabela III e a equação do “Perfect Mixing Model PMM” determinamos a taxa de fragmentação do feldspato no moinho de Bond. Através de várias simulações de valores da energia específica de cominuição chegamos na correlação entre a taxa de fragmentação e tamanho de partículas para moagem do feldspato no moinho de Bond onde o erro do ajuste do modelo foi mínimo.

Os dados utilizados no modelamento do moinho de Bond são sumarizados na Tabela III. Verifica-se nesta tabela as análises granulométricas da alimentação e descarga observada e calculada pelo PMM. Observa-se ainda que os ajustes do modelo representados pelos seus parâmetros com baixo desvio padrão podem ser uma conseqüência da incorporação das correlações definidas a partir dos ensaios com o moinho eletromecânico. Salientamos que nível de energia média do moinho de Bond utilizado para o cálculo da função de fragmentação apresentada nesta tabela foi de 0,21 Kwh/t.

**Tabela III** – Análises granulométricas utilizadas no modelamento do moinho de Bond, a função de fragmentação e os parâmetros do modelo com seus desvios padrão.

Tamanho das partículas (mm)															
3.36	2.83	2.38	1.68	1.19	0.840	0.500	0.297	0.210	0.149	0.105	0.074	0.053	0.044	0.037	0.025
Percentagem retida na alimentação do moinho de Bond															
13.10	3.98	25.90	22.27	9.71	11.29	4.34	2.66	1.24	1.47	1.23	0.78	0.69	0.25	0.25	0.84
Percentagem retida do produto de moagem															
0.69	0.40	1.36	1.32	1.13	2.12	6.58	16.03	12.0	15.56	10.35	10.10	11.62	3.09	1.77	5.90
Percentagem retida calculada do produto de moagem															
0.72	0.37	1.45	1.44	0.96	1.98	7.35	15.94	15.83	14.54	11.23	10.23	7.74	3.85	2.59	3.78
PARAMETROS		1.0262	7.2656	7.2436											
Desvio padrão		0.7614	0.2185	0.1896											

Utilizando a função de fragmentação apresentada na Tabela III e as distribuições granulométricas da alimentação e descarga do moinho de Bond a taxa de fragmentação normalizada em função dos tamanhos das partículas foi estabelecida para o moinho de Bond como pode ser observada na Figura 7. Esta figura mostra uma típica correlação entre taxa de fragmentação e tamanho das partículas para os moinhos de bolas.



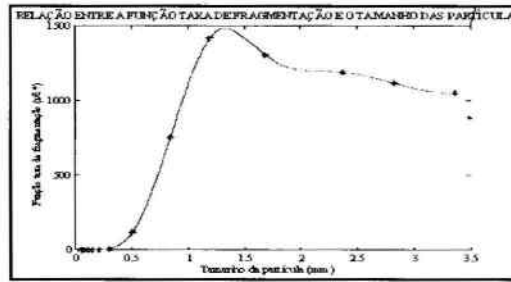


Figura 7 – Relação entre a taxa de fragmentação e o tamanho das partículas

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados deste trabalho apresentaram uma similaridade com os testes com o duplo pêndulo. Entretanto, os ensaios de fragmentação com o moinho eletromecânico permitem a determinação das características de cominuição através de ensaios com partículas múltiplas.

O moinho eletromecânico descreve melhor o processo de fragmentação nos equipamentos de moagem secundária e terciária bem como na moagem fina requerida pela indústria cerâmica na produção da barbotina.

A correlação entre a taxa de fragmentação e tamanho de partículas e as famílias de curvas para o feldspato, podem ser utilizadas no modelamento matemático dos moinhos de bolas. Devemos salientar que as informações deste trabalho provavelmente podem ser utilizadas no modelamento dos moinhos de bolas da indústria cerâmica, uma vez que, estes moinhos possuem revestimento e bolas com material semelhante ao da concha e das bolas do moinho eletromecânico que é de ágata, e operam em processos de moagem descontínuos.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Mineração da Universidade Federal da Paraíba, ao Departamento de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Pernambuco e a Tecbrita-Tecnologia em Britagem pelo apoio ao desenvolvimento deste artigo.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Lira, B. B. and Saito, F., "Grinding Parameters for copper smelting slags". Progress in Mineral Processing Technology, Daniel & Ersayn. pp 519-526 Rotterdam, 1994.
- Lira, B. B. " The development and application of an energy – based ball mill simulation and design technique ". Tese. University of Queensland, Austrália, 1990.
- Lira, B. B. "Modelos matemáticos de moagem: parâmetros e aplicação". XIV Encontro nacional de tratamento de minérios e hidrometalurgia. Vol I. P. 546-562 Salvador – BA, 1990.
- Lira, B. B. " Simulation of the Woodlawn Grinding Circuit " Report. University of Queensland, Austrália, 1985.
- Leung, K. An energy based, ore specific for autogenous and semi-autogenous grinding mill. Ph.D. Thesis. University Queensland, Australia, 1987.
- Narayanan, S. S., Lira, B. B., Rong, R. X. " A single particle breakage technique for the determination of comminution characteristic of Coal ". Bougainville Copper Limited, Papua Nova Guinéia Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre. Queensland, Austrália, Coal Preparation. vol. 5, pp. 211-227, 1988.
- Narayanan, S. S.; Whiten, W. J. Determination of Comminution Characteristics from Single Particle Breakage Test and its Application to Ball Mill Scale-up. In: Transactions Institute of Mining and Metallurgy. Section C.97,115 – 124, 1988.
- Narayanan, S.S. Developmen of a laboratory single particle breakage technique and its application to ball mill modelling and scale-up. Ph.D. Thesis. University of Queensland, 1986.
- Whiten, W. J. " The use of multi-dimensional cubic splines in regression and smooting ". The Australian Computer Journal, 3(2). 81-88, 1971.
- Whiten, W. J. A matrix theory of comminution machines. Chem. Engineering Science, 29, 589-599, 1974.
- Whiten, W. J. " Ball Mill Simulation Using small Calculators ". Proc. Australia. Inst. Min. Metall., 258, 47-53, 1976.