

## DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DE PRODUTOS DE COMINUIÇÃO TÉRMICA

W.T.Hennies, H.Delboni Jr. e A.P.Chaves  
(1) (2) (3)

Amostras de quartzo foram submetidas ao tratamento térmico para pré-fraturamento e depois submetidas à cominuição em diferentes equipamentos: moinhos de rolos, moinhos de martelos e moinhos de bolas. O exame dos produtos de cominuição demonstra que o fraturamento realmente ocorreu durante o processo térmico, a operação subsequente tendo meramente a função de soltar os aglomerados. Isto fica evidente das distribuições granulométricas e principalmente, da forma das partículas, que, produzidas por processos tão díspares de cominuição, não apresentam características muito diferenciadas.

## GRANULOMETRIC DISTRIBUTION OF THERMIC COMMINUTION PRODUCTS

Quartz samples were submitted to thermal shocking in view to its pre-fracturement and then to comminution in the following machines: roll mills, hammer mills and ball mills. Size distributions demonstrate that the fractures happened during the quenching step of the process and that the next mechanical step merely loosened the particle agglomerates. This becomes evident from size distributions and specially, from particles shape - as, produced by so different comminution processes, they would have different shapes.

---

(1) Professor Titular, Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Av. Prof. Mello Moraes, 2423 - 05508 - São Paulo.

(2) Professor Mestre em Engenharia, Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. No momento fazendo o programa de doutoramento na Queensland University.

(3) Professor Associado, Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

## 1. Introdução

A cominuição térmica, embora conhecida desde o século II A.C., é raramente praticada, seu uso se restringindo a aplicações onde as limitações dos processos convencionais de redução de tamanho impedem a sua utilização - como é o caso da moagem de quartzo de alta pureza. Este assunto tem sido objeto de pesquisa no Departamento de Engenharia de Minas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e este trabalho apresenta estudos referentes à distribuição granulométrica dos seus produtos.

Como processo de redução de tamanho, a cominuição térmica é uma operação de preparação, onde é feito um afrouxamento inicial dos fragmentos, seguida de uma cominuição final em moinho de rolos. Conforme discutido em trabalho anterior (1), o resultado obtido é totalmente coerente com o conceito introduzido por Bond em 1961, de "história anterior do material", pelo qual o resultado de qualquer operação de cominuição depende de maneira fundamental das microfrazes existentes no material cominuendo (2). Desta forma, o afrouxamento inicial induzido pela cominuição térmica torna possível a cominuição final em moinhos de rolos ou de martelos, equipamentos que seriam totalmente contra-indicados em condições normais, para material tão abrasivo como o quartzo.

A cominuição térmica decorre de diferentes mecanismos, tais como o choque térmico do material quente subitamente resfriado (expansões e contrações diferenciais), mudanças de fase (tensões provocadas das mudanças de volume decorrentes da de uma fase para outra), mudanças internas de volume em inclusões minerais, líquidas ou gasosas e, finalmente, de tensões diferenciais geradas pela anisotropia da dilatação de cristais individuais (1) quando em rochas policristalinas, como quartzitos.

## 2. Cominuição térmica do quartzo

O quartzo é o material mais bem estudado e para o qual existem aplicações industriais (1, 4 e 5). Quimicamente trata-se do óxido de silício, que existe em diferentes formas polimórficas, como o quartzo, a tridimita e a cristobalita, além de outras variedades obtidas em laboratório.

A variedade denominada quartzo alfa é estável à temperatura ambiente e tem a forma de um tetraedro onde o átomo de silício está cercado por quatro átomos de oxigênio, todos eles ligados por ligações covalentes. À temperatura de 573 graus C ela passa à variedade beta e a 870 graus C, a tridimita. A 1470 graus C, ocorre a transformação na cristobalita, que é estável até a temperatura de fusão, a 1713 graus C (3).

As densidades do quartzo, tridimita e cristobalita são respectivamente, 2,65, 2,27 e 2,33. As duas primeiras variedades têm dureza 7 Mohs enquanto que a última tem dureza entre 6 e 7.

As estruturas cristalinas das três variedades são respectivamente, trigonal, ortorrômbica e tetragonal (pseudo-cúbica).

A cominuição térmica sujeita o minério de quartzo a tensões crescentes mediante o aquecimento a temperaturas superiores a 900 graus C. Ocorre a transformação de quartzo beta em tridimita, com as conseqüentes variações volumétricas, que são da ordem de 14 %. Assim, um cristal individual de 10 cm de diâmetro dilata-se ou contrai-se cerca de 1,4 cm no processo de aquecimento ou resfriamento. Resulta portando o total afrouxamento da estrutura. O fenômeno é tão intenso que pode ser

discernido visualmente, pois o quartzo inicialmente transparente torna-se um material esbranquiçado e leitoso, desagregável à mão.

A grande vantagem é que as tensões internas, que se consistirão em núcleo de propagação de micro-fraturas, são originadas sem nenhum contacto físico com qualquer agente externo, como ocorre na cominuição mecânica, em que o esforço é transmitido via uma superfície metálica, a qual, durante o processo, sofre abrasão, contaminando portanto o material cominuído. Isto é especialmente interessante para materiais de alta pureza, que precisam ser obtidos em granulometria fina, como o próprio quartzo, cujo limite de ferro é recomendado ser inferior aos 500 ppb.

### 3. Trabalho experimental realizado

O propósito do experimento aqui descrito era verificar a influência da temperatura de pré-aquecimento e do equipamento utilizado para a desagregação do quartzo cominuído sobre a distribuição granulométrica e sobre a forma das partículas.

O trabalho experimental consistiu em aquecer amostras de quartzo a diferentes temperaturas, variando entre 600 e 1000 graus C, resfriá-las em água e a seguir, submetê-las a uma etapa final de cominuição variando o equipamento utilizado para isso: moinhos de rolos, moinhos de martelos e moinhos de bolas. Os produtos de cominuição foram submetidos à análise granulométrica e as frações granulométricas foram examinadas á lupa.

A tabela I esquematiza os experimentos executados. Os números que aparecem na tabela identificam as amostras ensaiadas. O ensaio a 800 graus foi portanto replicado com as amostras 2 e 4.

TABELA 1: EXPERIMENTOS EXECUTADOS

temperatura (graus C)	tipo de moinho		
	rolos	martelos	bolas
600	1	1	1
700	3	3	3
800	2 e 4	2 e 4	2 e 4
900	5	5	5
1000	6	6	6

A tabela II apresenta os resultados das análises granulométricas dos produtos de cominuição. Estes valores são agrupados nas tabelas III, IV e V, mediante equipamento utilizado na cominuição secundária e representados graficamente nas figuras 1, 2 e 3. Verifica-se que existe uma certa influência do equipamento utilizado na cominuição secundária, mas que esta influência é muito menor do que seria de se esperar em condições normais: as curvas de distribuição granulométrica têm andamentos semelhantes.

A figura 4 apresenta os intervalos de confiança das distribuições granulométricas, desprezando-se o efeito da temperatura, isto é das distribuições granulométricas obtidas com cada equipamento de cominuição secundária. Verifica-se que o moinho de bolas produz distribuições mais finas que os demais e que o moinho de rolos gera distribuições mais restritas que o de martelos.

FIGURA 1

Distr. gran. - Moinho de Bolas

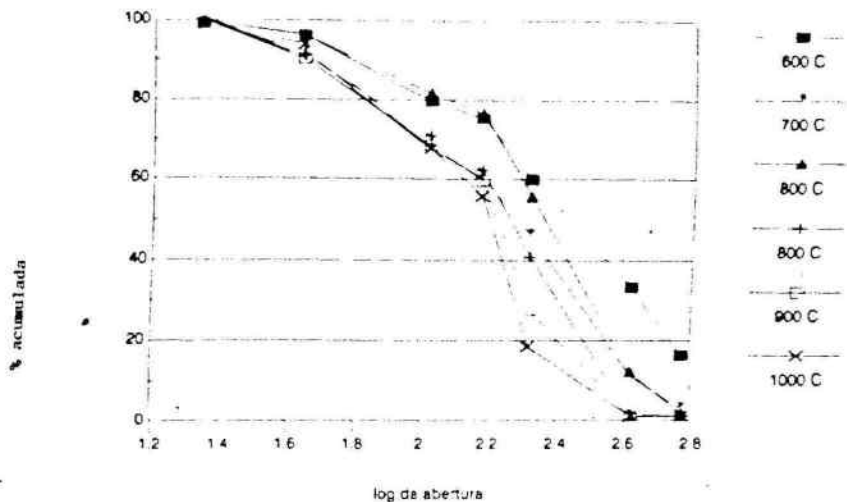
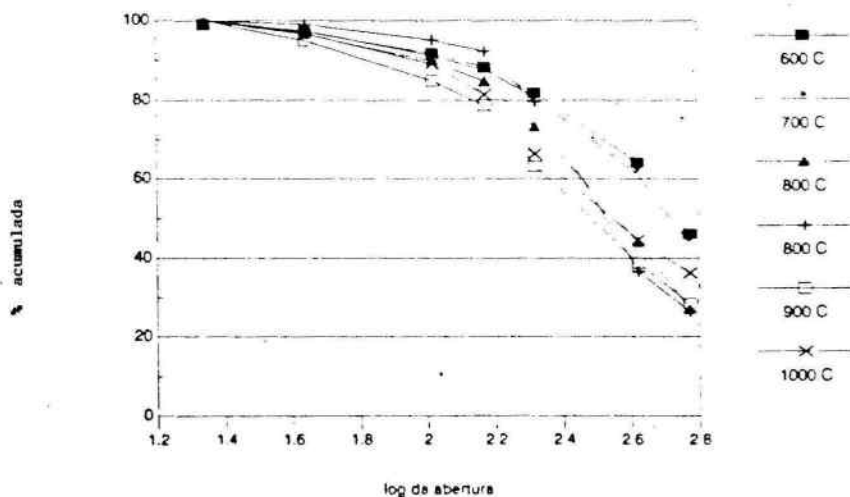


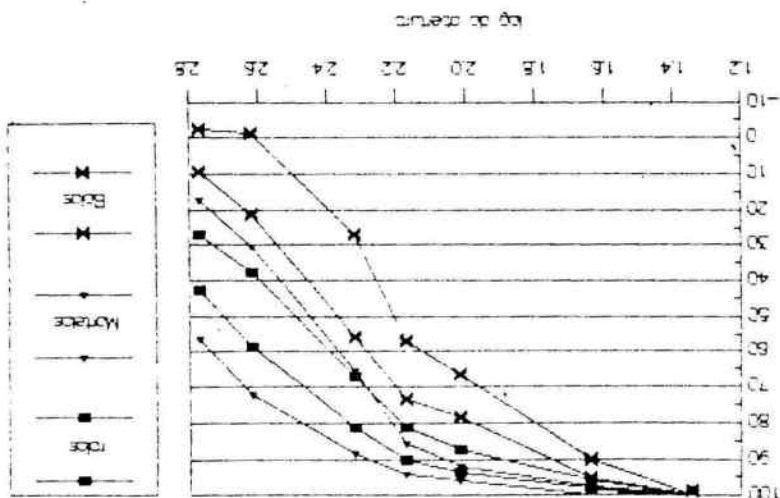
FIGURA 2

Distr. gran. - Moinho de Rolos





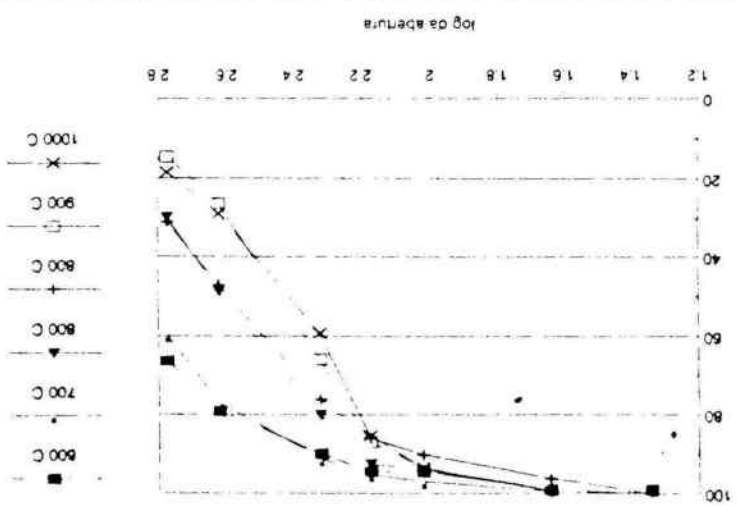
% acumulada



Amplitude das distribuições

FIGURA 4

% acumulada



Distr. gran. - Moinho de Martelos

FIGURA 3





TABELA V - DISTRIBUIÇÕES GRANULOMETRICAS DOS PRODUTOS DE  
MOINHOS DE MARTELOS  
(porcentagem acumulada retida)

temp. malha	600 C	700 C	800 C	800 C	900 C	1000 C
28	66.3	59.9	29.9	31.1	14.7	18.6
35	79.1	77.2	48.8	47.2	26.4	29.0
65	90.0	91.2	80.1	76.1	65.9	59.3
100	94.4	95.2	92.5	86.0	86.9	85.3
150	94.5	96.9	94.0	90.2	93.5	93.7
325	99.2	99.5	99.2	96.3	99.4	99.2
-325	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0

TABELA VI - AMPLITUDES DAS DISTRIBUIÇÕES  
DOS PRODUTOS

abertura malha	d	log d	rolos		martelos		bolas	
			m+d	m-d	m+d	m-d	m+d	m-d
28	595	2,8	42,6	26,7	56,3	17,2	9,4	-2,2
35	420	2,6	58,8	37,6	72,0	30,5	21,5	-1,4
65	210	2,3	81,5	66,9	88,8	65,4	56,0	26,8
100	150	2,2	90,1	81,0	94,1	86,0	73,1	56,9
150	105	2,0	93,5	87,3	95,8	91,8	78,5	66,8
325	44	1,6	98,3	95,8	99,9	97,7	95,6	90,0
-325	22	1,3	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

O efeito da temperatura sobre as distribuições granulométricas é mostrado nas figuras 5, 6 e 7. Verifica-se novamente que o moinho de bolas fornece sistematicamente distribuições granulométricas mais finas que os demais moinhos.

FIGURA 5

Distr. gran. - Baixa Temperatura

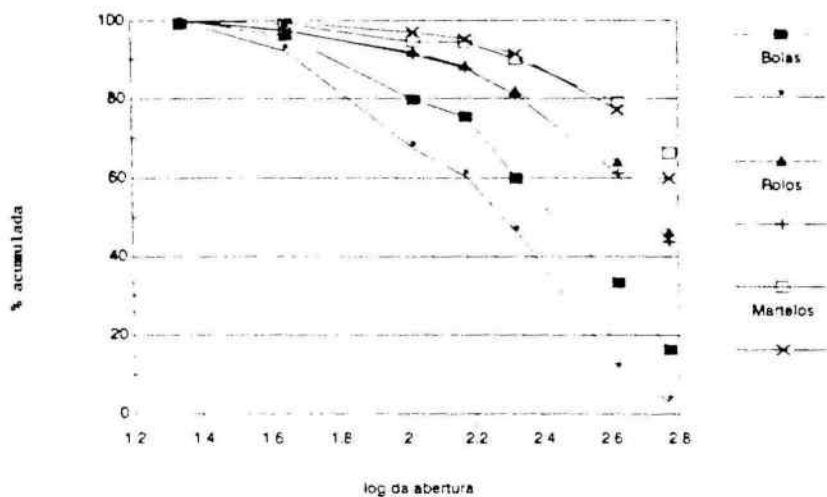
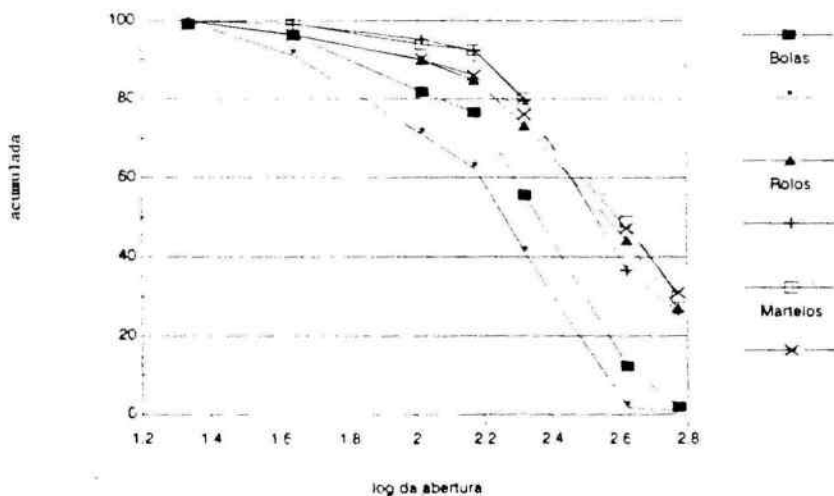


FIGURA 6

Distr. gran. - Media Temperatura



Para 600 e 700 graus C é possível distinguir as distribuições granulométricas dos moinhos de martelos e rolos, mas para temperaturas de pré-aquecimento superiores a 800 graus C as distribuições granulométricas se confundem.

Comparando as figuras 5, 6 e 7, fica evidente que conforme aumenta a temperatura de pré-aquecimento, as distribuições granulométricas tornam-se mais finas.

O exame em lupa das partículas resultantes do processo de cominuição mostra que elas têm formato acicular, independentemente do equipamento secundário empregado. Esperava-se que este formato pudesse ser modificado pelo uso do equipamento secundário, mas infelizmente isto não aconteceu (as partículas aciculares, em certa extensão são inconvenientes para a etapa de fusão do quartzo, pois formam uma verdadeira trama, dificultando o manuseio e dando origem a bolhas no produto fundido).

#### 4. Conclusões.

A forma e o tamanho das partículas resultantes depende primordialmente da etapa de tratamento térmico inicial e praticamente independe do procedimento subsequente de desagregação mecânica, para moinhos de rolos e de martelos.

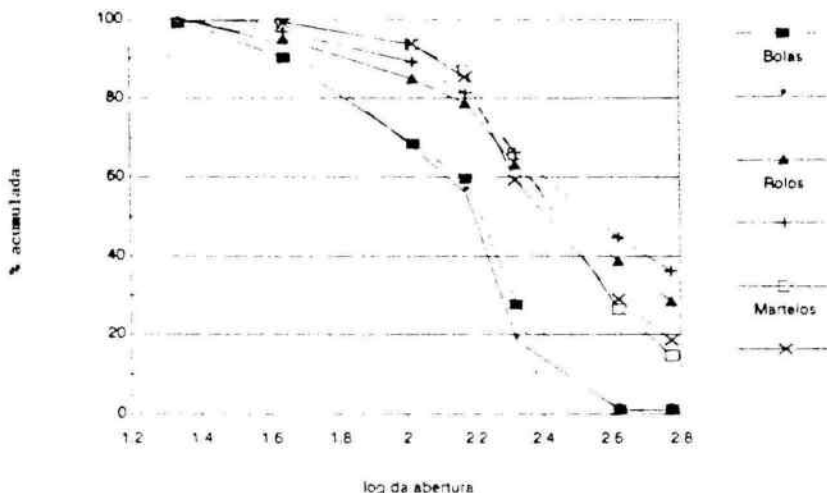
Moinhos de bolas tendem a dar distribuições granulométricas mais finas, mas mantendo o formato acicular das partículas.

As distribuições granulométricas fornecidas por moinhos de rolos sofrem menos influência da temperatura de pré-aquecimento que as dos demais moinhos.

Acima de 800 graus C as distribuições granulométricas obtidas de moinhos de rolos ou de martelo são praticamente iguais.

FIGURA 7

## Distr. gran. - Alta Temperatura

Bibliografia

- (1) HENNIES, W.T. e CHAVES, A.P. Cominuição térmica: aplicações industriais in Encontro Nacional de Tratamento de Minérios, 13o.. Anais. São Paulo, 1988, p. 783-93.
- (2) BOND, F.C. Crushing and Grinding Calculations. British Chemical Engineering, jan 61. Separata.
- (3) ERNST, W.G. Minerais e rochas. Blucher/Edusp. São Paulo, 1986.
- (4) COOK, N.G. e JOUGHIN, N.C. Fragmentación de rocas por métodos mecânicos, químicos y térmicos. Congresso internacional de minería, 6., Anais, Madrid, 1970, p. 223-8.
- (5) KANELLOPOULOS, A. e BALL, A. The fracture and thermal weakening of quartzite in relation to comminution. J. S.Af. Inst. Min. Met. oct. 1975, p. 45-52.