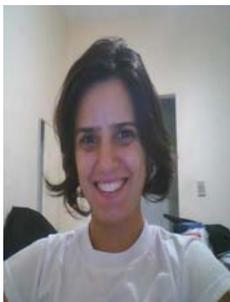


# INFLUÊNCIA DO TEMPO E DA GRANULOMETRIA NO PROCESSO DE MOAGEM DO QUARTZO NATURAL EM MOINHO PLANETÁRIO



## **Jaqueline Pereira de Aragão**

Graduanda em Engenharia de Minas, 7º período, UFPE  
Período PIBIC/CETEM : julho de 2010 à julho de 2011  
jaquelineparagao@yahoo.com

## **Pedro Luiz Guzzo**

Orientador, Eng. Mecânico, D.Sc.  
pguzzo@ufpe.br

## **1. INTRODUÇÃO**

As principais especificações dos minerais industriais estão relacionadas à pureza, ao tamanho e à morfologia das partículas. À medida que esses minerais são usados na fabricação de materiais sofisticados, tais como cerâmicas de alto desempenho, polímeros e fármacos, faz-se necessário maior controle dos processos de cominuição e classificação granulométrica. A moagem ocupa posição de destaque devido ao consumo de energia requerido para obtenção de partículas finas ( $< 100 \mu\text{m}$ ) e ultrafinas ( $< 10 \mu\text{m}$ ). O processamento de materiais ultrafinos ocorre em moinhos de alta energia, cujos principais tipos são: moinho a jato, de rotor, vibratório, centrífugo e planetário (Wellenkamp, 1999). O moinho planetário é assim chamado devido ao movimento dos vasos cilíndricos que se deslocam em trajetória circular ao redor de um ponto fixo central; lembrando o sistema solar. Neste moinho, predominam os esforços de impacto e atrito; sendo usados, à seco ou à úmido, para pequenas quantidades de amostra ( $< 2000 \text{ ml}$ ). Sua aplicação na indústria ainda é limitada devido à dificuldade de escalonamento do processo (Mio et al., 2004).

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo deste estudo foi investigar a influência do tempo de moagem e da granulometria de partida (alimentação) sobre a distribuição granulométrica resultante da moagem do quartzo natural em moinho planetário de bolas. A escolha do quartzo natural deve-se à sua ampla e diversificada aplicação (Guzzo, 2008). Com este estudo, espera-se contribuir para um melhor entendimento da cinética de moagem de minerais duros e frágeis em moinho planetário.

## **3. METODOLOGIA**

Neste trabalho foram utilizados quatro blocos de quartzo leitoso procedente do município de Tanhaçu (BA). As incrustações superficiais foram removidas por meio de limpeza em água corrente, seguida de ataque químico em solução de HF (5%) durante 50 horas. A Figura 1 apresenta os blocos após limpeza, cuja massa total foi de 8,3 kg.

A fragmentação dos blocos foi realizada em três etapas de britagem. As duas primeiras realizadas em britadores de mandíbulas de um eixo; com aberturas de entrada e saída decrescentes. O produto desta fragmentação foi classificado em peneira de malha de 1,4 mm (12 malhas). O material retido nesta malha foi rebitado em britador de rolos até que todo material fosse passante nesta mesma malha. Após britagem, o material foi classificado em peneiras da série Tyler nas seguintes faixas granulométricas: 1400x850  $\mu\text{m}$ , 850x500  $\mu\text{m}$ , 500x300  $\mu\text{m}$ , 300x150 $\mu\text{m}$ , 150x75 $\mu\text{m}$  e -75 $\mu\text{m}$ . Devido à contaminação introduzida pelas etapas de britagem (essencialmente partículas de aço), foi efetuada uma limpeza das frações com um ímã de mão.

Para os ensaios de moagem, foram preparadas alíquotas de 35 ml ( $\sim 48 \text{ g}$ ) de partículas das seguintes faixas granulométricas: 1400x850, 850x500, 500x300 e 300x150  $\mu\text{m}$ . O volume de 35 ml foi determinado obedecendo as capacidades mínima e máxima do vaso (pote) descritas no manual do fabricante. A moagem foi realizada no moinho planetário *Fritsch Pulverisette 5* (1300 W), via seco, no interior de dois vasos cilíndricos de ágata com volume interno de 250

ml. A carga de corpos moedores de cada vaso foi constituída por 40 esferas de ágata de 10 mm de diâmetro, ocupando o volume de 21 ml. Assim, o grau de enchimento e preenchimento de vazios em cada vaso foi de 8,4 e 14 %, respectivamente. Os ensaios foram realizados nos tempos de 2, 4, 8, 16, 30 e 60 minutos, com velocidade de revolução de 150 rpm.

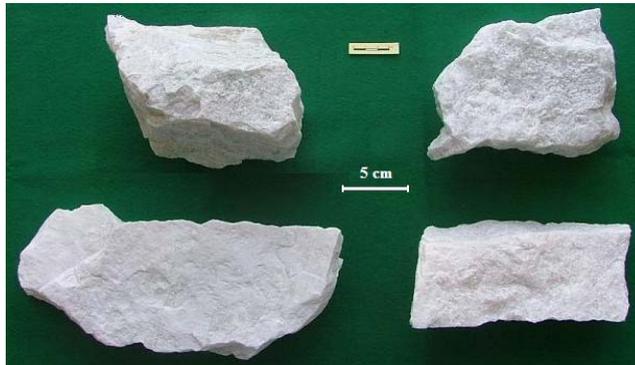


Figura 1. Blocos de quartzo natural de Tanhaçu (BA) após limpeza com HF (5%).

As análises granulométricas dos produtos da moagem foram realizadas via seco utilizando-se peneiras da série Tyler com abertura entre 1400 e 150  $\mu\text{m}$ . A distribuição granulométrica do material passante na malha 150  $\mu\text{m}$  foi complementada por meio de medidas em um granulômetro a laser modelo *Malvern Mastersizers 2000*, via úmido, com o acessório *Hydro 2000*. Foram realizadas três medidas para cada alíquota moída. Assim, cada alíquota apresentou duas curvas de distribuição granulométrica: uma do material acima de 150  $\mu\text{m}$  e outra da material abaixo de 150  $\mu\text{m}$ . Este procedimento foi realizado para as alíquotas moídas cujas alimentações estavam nas seguintes faixas: 1400x850, 850x500 e 500x300  $\mu\text{m}$ . O produto resultante da alimentação 300x150  $\mu\text{m}$  foi diretamente analisado no granulômetro a laser; uma vez que todo material apresentava granulometria visualmente fina. A Figura 2 mostra duas curvas características. A partir de curvas como essas, foram obtidos os parâmetros  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ , e  $d_{90}$ , que são, respectivamente, o diâmetro por onde passa 10, 50 e 90 % do material moído. Calculou-se também o fator  $d_{90}/d_{10}$  para avaliar a heterogeneidade da distribuição. Para as análises com granulômetro a laser também foi determinada a área superficial específica ( $S$ ).

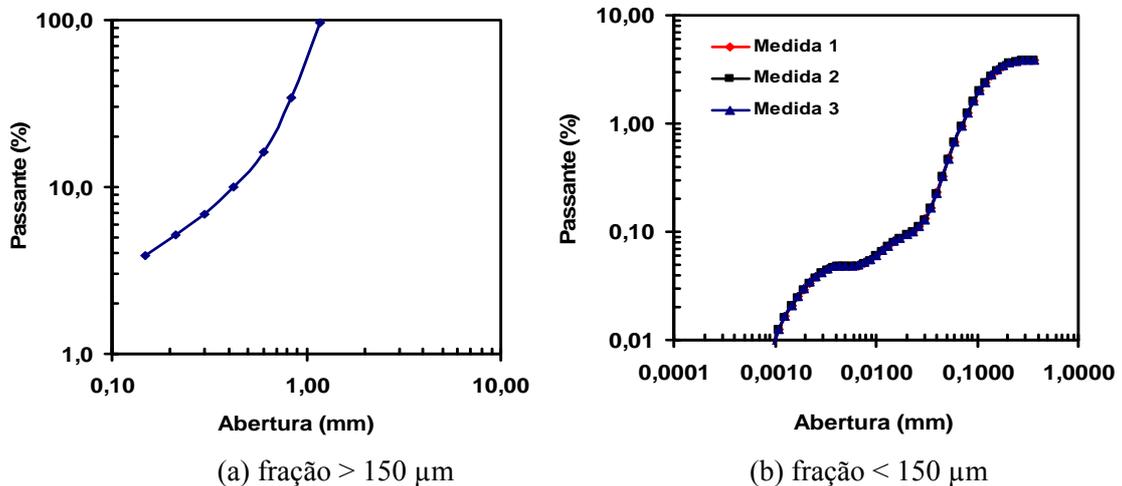


Figura 2. Curvas de distribuição granulométrica típicas do quartzo natural moído em moinho planetário de bolas. Alimentação: 1400x850  $\mu\text{m}$ ; Revolução: 150 rpm; Tempo: 4 minutos.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 apresenta os parâmetros determinados a partir das análises granulométricas em função do tempo de moagem. Na Figura 3(a) observa-se que o parâmetro  $d_{50}$  decresce com tempo de moagem para todas as alimentações. Isto ocorre de forma mais significativa para as alimentações grossas e tempos de moagem inferiores a 30 minutos. Para moagens acima de 30 minutos, observa-se que  $d_{50}$  praticamente não variou para a alimentação 300x150  $\mu\text{m}$ . Após 60 minutos, o valor de  $d_{50}$  para esta alimentação foi  $(26,7 \pm 4,0) \mu\text{m}$ . Por sua vez, o parâmetro  $d_{90}/d_{10}$ , apresentado na Figura 3(b), mostra que a heterogeneidade da distribuição cresceu significativamente, sobretudo para as alimentações 1400x850 e 850x500  $\mu\text{m}$ . Para as alimentações menos grossas, observa-se um aumento menos acentuado da heterogeneidade; em particular para a alimentação 300x150  $\mu\text{m}$ , onde  $d_{90}/d_{10}$  praticamente não aumentou a partir de 30 minutos. A Figura 3(c) apresenta a variação da área superficial específica ( $S$ ), determinada apenas para a alimentação 300x150  $\mu\text{m}$ . Observa-se um brusco aumento de  $S$  entre 16 para 30 minutos. Acima de 30 minutos,  $S$  praticamente não variou. As análises conjuntas dos parâmetros  $d_{50}$ ,  $d_{90}/d_{10}$  e  $S$  indicam que condição limite de moagem do quartzo na configuração estabelecida (esferas 10 mm; 150 rpm; etc) foi atingida apenas para alimentação 300x150  $\mu\text{m}$ . A grande heterogeneidade observada nas alimentações 1400x850 e 850x500  $\mu\text{m}$  após 60 minutos indica que ainda existe uma grande quantidade de partículas grossas no produto.

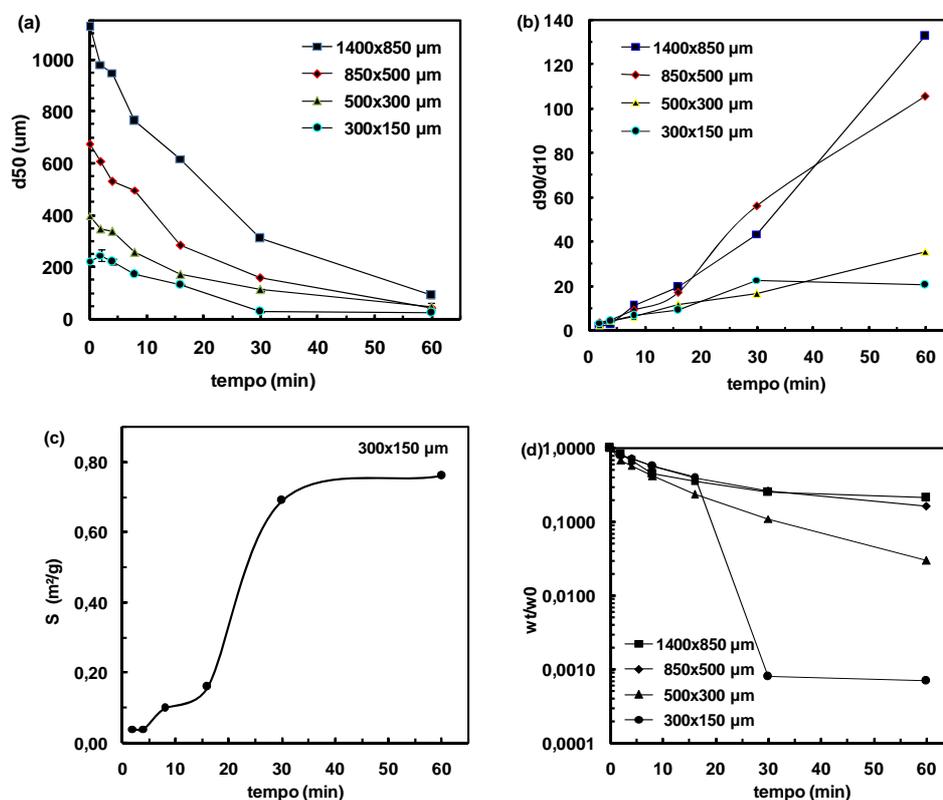


Figura 3. Evolução dos parâmetros  $d_{50}$  (a),  $d_{90}/d_{10}$  (b), área superficial específica (c) e fração mássica residual da alimentação (d) em função do tempo de moagem.

A cinética de um processo de quebra de partículas de uma dada classe de tamanhos pode ser analisada considerando a fração mássica da alimentação que não se fragmenta após um determinado tempo de moagem ( $w_i$ ) em relação à massa inicial ( $w_0$ ). A Figura 3(d) apresenta a fração mássica residual normalizada ( $w_i/w_0$ ) em função do tempo de moagem para os quatro tamanhos de alimentação. Observa-se que nas alimentações mais grossas, cerca de 20% das partículas ainda não sofreram quebra mesmo depois de 60 minutos de moagem. Por sua vez, a alimentação 300x150  $\mu\text{m}$  sofreu grande redução na quantidade de partículas após 30 minutos, quando menos de 0,1 % de partículas da alimentação permaneceram intactas. Para o caso de uma alimentação constituída por partículas de mesmo tamanho nominal (distribuição

monodispersa) submetida a um processo de moagem descontínua (por batelada) em moinho rotativo de bolas, Austin & Bagga (1981) propuseram a seguinte relação para descrever a massa de partículas que não sofreu quebra após um tempo  $t$  de moagem:

$$w_1(t) = w_0(0)e^{-k_1 t} \quad (1)$$

onde  $k_1$  é a taxa específica de quebra ( $\text{min}^{-1}$ ). Para uma cinética de 1ª ordem,  $k_1$  é invariável com o tempo. Seu valor é encontrado linearizando a curva dada pela Equação 1 em uma escala log-linear. Na Figura 3(d), um comportamento não-linear entre  $w_t/w_0$  e  $t$  é observado para todas as alimentações. Longos períodos de moagem podem causar desvios da cinética de 1ª ordem; seja pelo amortecimento dos impactos devido ao acúmulo de finos na carga; seja pela aglomeração de partículas finas sobre as grossas (Austin & Bagga, 1981; Tavares & Kreischer, 2004). Assim, a Figura 4 mostra a variação de  $w_t/w_0$  até 16 minutos de moagem. Novamente, um comportamento não-linear é observado. Este resultado sugere que, na configuração de moagem estabelecida, a cinética de quebra do quartzo em moinho planetário não é de 1ª ordem. Portanto, não é possível determinar a taxa específica de quebra por meio da Equação 1. Os resultados atuais são insuficientes para concluir se a não-linearidade observada deve-se apenas ao ambiente de moagem ou também devido ao efeito do material (resistência à fratura das partículas grossas de quartzo) face à magnitude dos eventos de quebra induzidos pelas bolas de ágata.

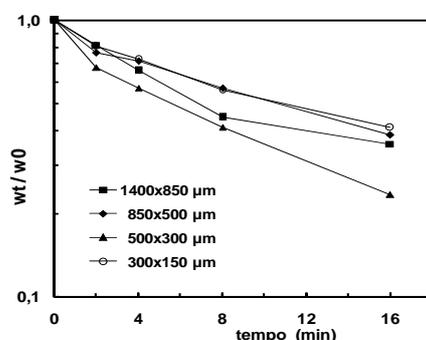


Figura 4. Fração mássica residual da alimentação na moagem do quartzo em moinho planetário.

## 5. AGRADECIMENTOS

Ao Dr. João Sampaio (CETEM) pelo envio dos blocos de quartzo e ao técnico Marcelo Gomes (UFPE) pelo auxílio nas análises granulométricas. Ao PIBIC/CNPq/CETEM pela bolsa de IC.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUSTIN, L.G., BAGGA, P. An analysis of fine dry grinding in ball mills. **Powder Technol.**, v. 28, p. 83-90, 1981.
- GUZZO, P.L. Quartzo. In: Rochas & Minerais Industriais: Usos e Especificações, A.B. Luz e F.F. Lins, (editores), CETEM/MCT, Rio de Janeiro, 2ª ed., p.681-721, 2008.
- MIO, H.; KANO, J.; SAITO, F. Scale-up method of planetary ball Mill. **Chemical Eng. Science**, v. 59, p. 5909-5916, 2004.
- TAVARES, L.M.M., KREISCHER A.T. Análise da taxa de quebra na moagem a seco em moinho de bolas planetário. Anais do XX ENTMME, Florianópolis, v. 1, p. 233-240, 2004.
- WELLENKAMP, F.J. Moagem fina e ultrafina de minerais industriais: uma revisão. **Série Tecnologia Mineral**, CETEM/MCT, Rio de Janeiro, v. 75, 55 p., 1999.