

Moagem em Moinho de Bolas: Estudo de algumas Variáveis e Otimização Energética do Processo

Manuel Joaquim P.M. Ribeiro e João Carlos Castro Abrantes

Escola Superior de Tecnologia e Gestão

Instituto Politécnico de Viana do Castelo – Portugal

e-mail: ribeiro@estg.ipv.pt

Resumo: A moagem descontínua em moinhos de bolas é um processo de redução granulométrica freqüente na preparação de pastas cerâmicas (porcelana, faiança, grês e terracota) e de vidrados. Habitualmente a sua utilização limita-se à moagem das matérias-primas vulgarmente designadas por não plásticas (ou duras), nomeadamente: areias, calcitas, dolomitas, feldspatos e fritas.

Neste trabalho apresenta-se uma série de resultados experimentais que procuram clarificar a influência da *natureza da matéria-prima*, da *densidade da suspensão* e da *taxa de ocupação* do moinho, na operação de moagem. Por último, efetuou-se ainda uma análise dos consumos energéticos envolvidos.

Palavras-chaves: *moagem, moinho de bolas, otimização de processo*

Introdução

O objetivo de qualquer processo de moagem é a diminuição do tamanho das partículas de um material sólido, tendo em vista o aumento da superfície específica para melhorar a velocidade de reação de determinada matéria-prima (por exemplo durante a queima), misturar de um modo mais uniforme vários materiais (durante o processo de preparação de uma pasta) e permitir a obtenção de um pó com as características ideais de utilização (por exemplo nos corantes).

Sabe-se também que o tamanho das partículas exerce uma influência determinante nas propriedades e comportamento dos materiais ao longo do processo de fabrico, como por exemplo: no comportamento reológico, na conformação, na queima e nas características finais do produto¹.

De um modo geral, o rendimento da moagem é influenciado pelas características da própria matéria-prima, nomeadamente:

- dimensão e forma inicial das partículas,
- dureza do material (resistência à compressão, ao choque e à abrasão),
- estrutura homogênea ou heterogênea,
- umidade ou higroscopicidade,
- sensibilidade à variação da temperatura,
- tendência à aglomeração.

O moinho de bola, ou moinho Alsing, é um equipamento de moagem bastante utilizado na indústria cerâmica, nomeadamente para a moagem de pastas, ou dos seus componentes duros (principalmente em cerâmica de pavimentos, revestimentos, sanitários, louça utilitária e decorativa).

A moagem neste tipo de moinhos pode ser a seco ou úmido e o processo pode ser contínuo ou intermitente, embora o mais comum na indústria cerâmica seja a moagem descontínua e a úmido. Estes moinhos são constituídos por um cilindro oco, de metal, com um eixo na posição horizontal sobre o qual é imprimido um movimento de rotação (figura 1). No seu interior, forrado com um material

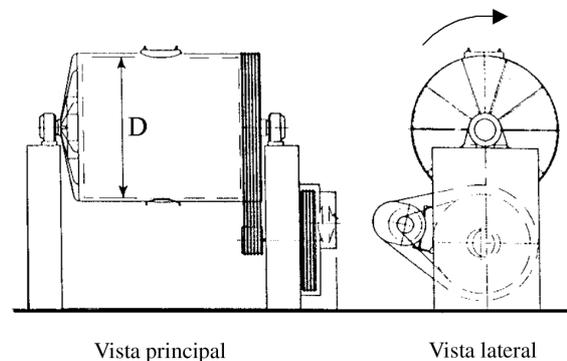


Figura 1. Moinho de bolas descontínuo (D - diâmetro interno).

duro ou com borracha, rolam os corpos moedores em conjunto com o material a serem moídos.

A velocidade de rotação dos moinhos de bolas é calculada em função da velocidade angular crítica (V_{AC}), que é a velocidade à qual as componentes das forças centrífuga e do peso do material se igualam (resultando nula a ação de moagem) e que se encontra relacionada com o diâmetro interno do moinho (D) pela seguinte equação:

$$V_{AC} = 42,3 / (D)^{1/2}$$

A **velocidade ótima de rotação** é da ordem dos 75% da velocidade crítica, aplicável para moinhos com corpos moedores de baixa densidade, recomendando-se valores inferiores, da ordem dos 60%, quando se utilizam corpos moedores de alta densidade¹.

A figura 2 ilustra quatro diferentes situações, em termos de velocidade de rotação do moinho, determinando diferentes rendimentos de moagem². Em (A) a aceleração centrífuga (a_c) é muito inferior à aceleração da gravidade (g), o que origina um ângulo formado pelas bolas (β) inferior a 45° e, conseqüentemente, um baixo grau de moagem.

Em (C) o ângulo β é aproximadamente igual a 90°, a partir do qual se atinge a velocidade crítica e deixa de haver moagem ($\beta > 90^\circ$, situação D).

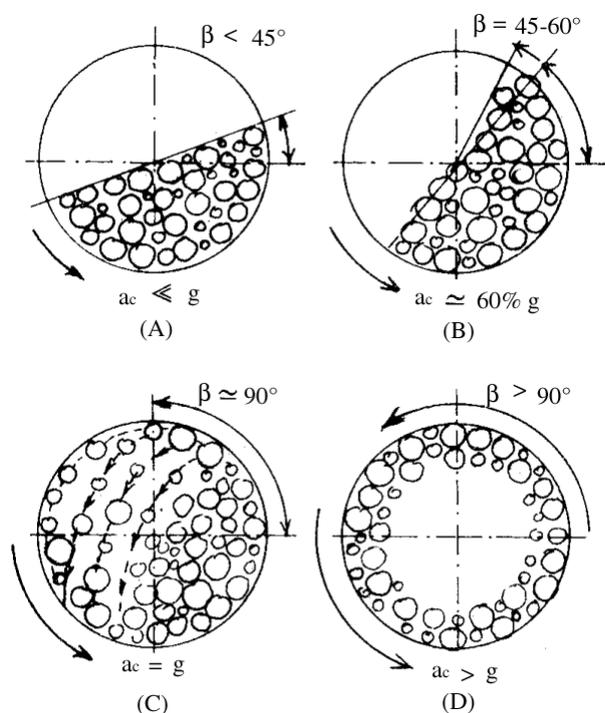


Figura 2. Ilustração esquemática do interior de um moinho de bolas para quatro diferentes valores da aceleração centrífuga (a_c). β - ângulo formado entre o plano das bolas inclinadas e a horizontal (*ângulo de cascata*)².

Em (B) as bolas elevam-se até um ângulo de 45-60°, relativamente à horizontal, e rolam em cascata até à zona inferior do moinho promovendo um bom grau moagem. No entanto, devido à grande quantidade de bolas, a sua queda não é livre e não ocorre para todas ao mesmo tempo: as das camadas mais internas têm menor força centrífuga e caem antes das que se situam nas camadas mais externas. De todos estes movimentos (queda das bolas mais periféricas e rolamento das mais centrais umas sobre as outras) deriva a ação de moagem por choque, esmagamento, corte e atrito dos materiais que se encontram misturados com os corpos moedores³. O material a ser moído deve encher, ou exceder ligeiramente, o espaço vazio entre as bolas.

A quantidade de bolas necessária para uma moagem em condições ótimas é de 50-55% da capacidade líquida do moinho. No entanto essa ocupação de volume não é efetiva, dado os espaços vazios entre as bolas, pelo que o volume real ocupado é de, aproximadamente, 60% desse volume³. Para o cálculo da quantidade de bolas a usar num moinho pode-se utilizar a seguinte fórmula:

$$P = V \times d_b \times p \times 0,60$$

Onde:

P: quantidade de bolas (Kg);

d_b : peso específico das bolas (Kg/L);

V: volume útil do moinho (L);

p: taxa de ocupação aparente das bolas (0,50 a 0,55);

Procedimento Experimental

Para avaliar a influência da natureza da matéria-prima na evolução da moagem foram realizados vários ensaios, nas mesmas condições de carga do moinho (com o nível de bolas e a densidade da suspensão de moagem constantes) para as seguintes matérias-primas nacionais: areia Mibal (da zona de Barqueiros), calcita (Mário Moderno), dolomita (Mário Moderno) e um feldspato da Felmica (Viseu). As granulometrias médias iniciais destas matérias-primas estão indicadas na tabela 1, juntamente com as respectivas durezas.

Posteriormente realizaram-se ainda estudos de moagem variando a quantidade de matéria-prima a moer e a densidade da suspensão de moagem.

Tabela 1. Granulometrias médias e durezas⁴ das matérias-primas cerâmicas.

Matéria-Prima	Granulometria média (mm)	Dureza (escala de Mohs)
Areia	4 - 8	7
Calcita	6 - 14	3
Dolomita	4 - 8	3,5 - 4
Feldspato	4 - 12	6 - 6,5

Em todas as moagens foi utilizada uma argila plástica, designada por BM9 (Mário Moderno, Barracão) como agente suspensor (10% em peso). Ao longo dos diversos ensaios foram-se retirando amostras de 100 mL, de hora em hora, e determinou-se a percentagem de resíduo na peneira de 71 µm de cada amostra.

Finalmente, com o intuito de analisar a influência da taxa de ocupação do moinho no consumo energético deste tipo de operação, efetuaram-se quatro moagens com o volume de sólidos variando entre 15 e 30% do volume total do moinho, mantendo constante o tipo de matéria-prima (feldspato Felmica, ref. LI) e a densidade da suspensão (1,675). O valor da densidade da suspensão é superior aos valores normalmente utilizados nas indústrias cerâmicas para permitir a obtenção das taxas de ocupação desejadas, por exemplo, é impossível efetuar a carga de um moinho com uma taxa de ocupação de sólidos superior a cerca de 22% com uma suspensão com uma densidade de 1,5. Efetuaram-se medidas da corrente de pico no arranque e durante a evolução da moagem.

Influência da natureza das matérias-primas

A moagem de quatro diferentes matérias-primas, tradicionalmente usadas na indústria cerâmica e habitualmente designadas por *duros* ou *não plásticos*, foi efetuada em idênticas condições de processamento: densidade da suspensão entre 1,59 - 1,61 e um volume de material seco constante (25% do volume útil do moinho).

Os resultados obtidos permitem constatar que existem dois fatores que determinam a evolução do grau de moagem dos diferentes materiais. O primeiro está relacionado com a própria granulometria de partida de cada matéria-prima, que condiciona a evolução inicial da moagem. O segundo fator, e por ventura o mais importante, tem a ver com a dureza de cada matéria-prima e, como seria de esperar, materiais mais duros são mais difíceis de moer.

A conjugação destes dois fatores explica a permuta da posição relativa das curvas referentes à areia e ao feldspato (ao fim de 10 horas de moagem), uma vez que a menor

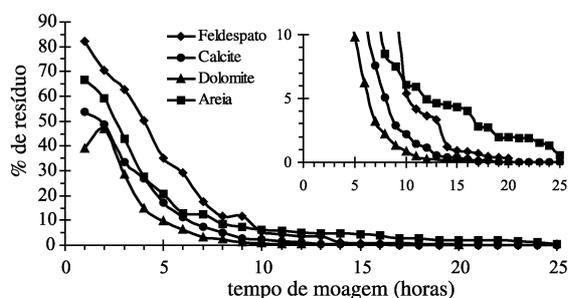


Figura 3. Evolução do grau de moagem de quatro diferentes matérias-primas cerâmicas (densidade da suspensão de moagem aproximadamente constante, entre 1,59 - 1,61).

granulometria de partida da areia permitiu evidenciar uma evolução mais favorável da moagem, até ao momento em que o efeito da dureza do material passou a ser preponderante (zona de granulometrias mais finas, onde prevalece a ação de moagem por atrito).

Relativamente à calcita e à dolomita, verifica-se que ambas apresentam melhor apetência para a moagem, comparativamente à areia e ao feldspato, o que seria de esperar apenas tendo em consideração a menor dureza destes dois materiais (cerca de metade, ver tabela 1). No entanto é a dolomita que apresenta maior grau de moagem (embora possua uma dureza ligeiramente superior à da calcita, 3,5 - 4 contra 3 da calcita) manifestando-se, neste caso, como fator determinante a granulometria inicial destas duas matérias-primas.

A subida aparente do valor do resíduo, da primeira para a segunda hora de moagem, no ensaio efetuado com a dolomita, deve-se a dificuldades na obtenção de uma amostra representativa para a primeira hora (como o grau de moagem é ainda muito baixo, as partículas tendem a sedimentar rapidamente).

Influência da densidade da suspensão de moagem

Os ensaios relativos ao estudo da influência da densidade da suspensão na evolução do grau de moagem foram realizados com dolomita e os resultados obtidos encontram-se representados graficamente na figura 4.

O gráfico anterior permite observar que a evolução do grau de moagem é influenciado pela densidade da suspensão e que a granulometria da dolomita diminui mais rapidamente para valores de densidade mais baixos.

No entanto, considerando um grau de moagem de 1% de resíduo na peneira de 71 µm, os resultados obtidos em termos de rendimento de moagem (quantidade de matéria-prima moída por hora de funcionamento, tabela 2), sugerem que a eficiência de moagem cresce com o aumento da densidade da suspensão, pelo que o rendimento final da operação de moagem é maior.

Influência da taxa de ocupação do moinho

Os ensaios relativos ao estudo da influência da quantidade de matéria-prima a moer foram realizados com o feldspato da Felmica (ref. LI), mantendo a densidade da

Tabela 2. Eficiência de moagem, considerando um moinho com um volume de suspensão de 200 litros.

Densidade	Matéria-prima (seca) (g/L)	Matéria-prima (seca) (kg)	Eficiência (kg/h)
1,34	566,6	113,3	18,9
1,59	983,3	196,7	20,7

suspensão aproximadamente constante ($d = 1,48 - 1,50$). Os resultados obtidos são apresentados no gráfico da figura 5.

Como se pode verificar, para menores quantidades de matéria-prima a moer (menores taxas de ocupação do moinho) correspondem, na fase inicial do processo, maiores rendimentos de moagem, originando valores iniciais de resíduo mais baixos. No entanto verifica-se que para valores de resíduos na ordem dos 2% o tempo de moagem é muito semelhante, cerca de 18-20 horas (excetuando o ensaio com 6,3% ocupação), pelo que o maior rendimento de moagem se verifica para a maior taxa de ocupação do moinho.

O ensaio correspondente à menor ocupação, em termos de volume útil do moinho (6,3%) apresenta sem dúvida uma evolução na moagem muito rápida. No entanto, estas condições de moagem dão origem a elevados níveis de

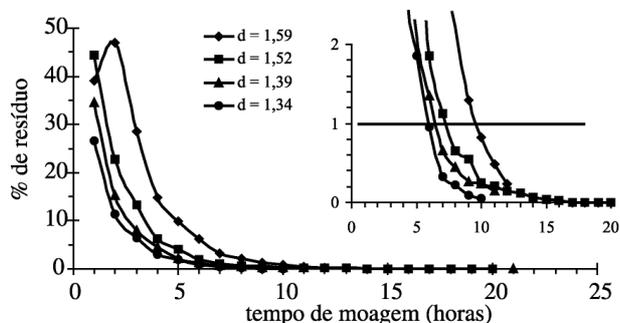


Figura 4. Evolução do grau de moagem da dolomita para diferentes valores da densidade da suspensão de moagem (d).

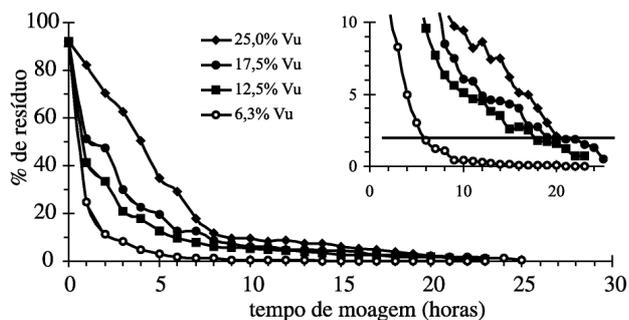


Figura 5. Evolução do grau de moagem do feldspato Felmica (ref. LI) para diferentes taxas de ocupação do volume útil do moinho, Vu (% de volume correspondente apenas à ocupação do feldspato).

Tabela 3. Consumos energéticos para diferentes taxas de ocupação do moinho, considerando o custo da energia elétrica de 0,08174 US\$/kW.h (em Janeiro 2001, Portugal).

Ocupação (%)	Carga (kg)	Tempo de moagem (h)	Consumo (kW.h)	Rendimento (kg/h)	Custo específico (US\$/ton)
30	88,92	35	50,82	2,54	46,72
25	74,10	26	36,55	2,85	40,32
20	59,28	20	27,92	2,96	38,50
15	44,46	16	21,44	2,78	39,41

desgaste, quer das bolas quer das forras, não sendo, por isso mesmo, muito aconselhadas.

Consumos energéticos envolvidos

Os consumos energéticos envolvidos neste tipo de moagem foram avaliados através da medição da corrente com uma pinça amperimétrica e considerando ter-se atingido o fim da moagem para resíduos $\leq 1\%$, ao peneiro de $71 \mu\text{m}$. Os resultados obtidos em termos de energia elétrica despendida durante a moagem (em kW.h), do custo específico (em dólares por tonelada de material, US\$/ton) e o rendimento em cada operação de moagem (quantidade de material moído por hora, kg/h), encontram-se na tabela 3.

O pico de corrente observado no arranque é quase o dobro da corrente consumida durante o resto do processo de moagem, sendo estas duas correntes praticamente independentes da taxa de ocupação do moinho. Nestas condições, a eficiência, ou rendimento, de moagem é que vai condicionar o seu custo específico. Esta constatação só é válida para o moinho utilizado (cerca de 120 litros), sendo provável que para moinhos industriais de maiores dimensões, a pequenas taxas de ocupação correspondam maiores consumos, devido ao elevado momento (binário) gerado por a carga se encontrar deslocada para uma única região do moinho. Neste momento decorrem alguns testes para verificação experimental desta hipótese.

Como se pode verificar a taxa de ocupação do moinho mais favorável, em termos de consumo energético, é a de 20%. Com esta taxa de ocupação obtém-se custos energéticos por tonelada de material moído mais baixos (cerca de 38,50 US\$/ton), uma vez que o rendimento por hora de moagem é o maior (2,96 kg/h).

Para uma taxa de 15% de ocupação, o consumo elétrico é o mais baixo, mas como a quantidade de material moído é inferior (por unidade de tempo de moagem) o seu rendimento é menor e o custo específico torna-se mais elevado.

Conclusões

A dureza e a granulometria inicial de cada matéria prima são fatores que condicionam a evolução do grau de moagem. Quando as matérias primas possuem graus de dureza relativamente diferentes, este fator passa a controlar a evolução da moagem. A granulometria inicial só afeta

significativamente a moagem, nos casos em que as matérias primas possuem graus de dureza semelhantes.

Maiores densidades da suspensão resultam em maiores rendimentos de moagem, não existindo assim qualquer vantagem em se moer com suspensões de baixa densidade. Além disso os processos seguintes envolvem, normalmente, a remoção de água (p.e. atomização e filtroprensagem).

As maiores taxas de ocupação do moinho levam a maiores rendimentos de moagem. Considerando os ensaios efetuados, uma carga correspondente a 25% do volume útil pode ser um bom valor de referência, para a moagem deste tipo de matérias primas cerâmicas em moinhos de bolas.

Pensando unicamente nos consumos energéticos da operação de moagem, taxas de ocupação de 20% parecem ser as mais aconselháveis para moinhos desta dimensão, no entanto, tendo em consideração os prováveis aumentos de

desgaste (do revestimento e dos corpos moedores) e a utilização de moinhos de maior capacidade, é de admitir que valores compreendidos entre 20 a 25% de ocupação sejam uma boa referência.

Referências Bibliográficas

1. “Almanaque Cerâmico” Centro Tecnológico da Cerâmica e do Vidro, *Kéramica*, pp.111-112, Nº 227, Jan/Fev., 1998.
2. Romano Ferrari, “Manuale della macinazione con mulini a tamburo rotante”, Faenza Editrice, 1985.
3. A.T. Fonseca, “Moinho de bolas de marcha descontínua”, *Revista da Sociedade Portuguesa de Cerâmica e Vidro*, Vol 2, Nº 1, pp. 11-21, Jan-Mar, 1983.
4. W.A. Deer, R.A. Howie and J. Zussman “Minerais constituintes das rochas - Uma introdução”, Fundação Calouste Gulbenkian, 1981.