

FRAGMENTAÇÃO DE SÓLIDOS

1. INTRODUÇÃO

A fragmentação de sólidos é uma operação unitária que tem por objetivo reduzir o tamanho dos fragmentos de determinado material (matéria-prima ou produto final). Também é usado o termo cominuição para redução de tamanho e inclui processos como esmagar, moer, picar, porcionar (*dicing*), entre outros.

Os termos usualmente empregados estão relacionados a uma aplicação particular, por exemplo: moer cereais, picar carne de boi, porcionar tubérculos, ou triturar temperos. O mecanismo de redução irá deformar o alimento até que ele quebre ou rompa. A quebra de materiais duros ocorre ao longo de rachaduras ou defeitos na estrutura e é alcançada aplicando diferentes tipos de força. Os tipos de forças comumente usados são: de compressão, de impacto, de atrito ou cisalhamento, e de corte.

Exemplos de fragmentação de sólidos são: moagem de cristais para facilitar sua dissolução (lixiviação), britamento e moagem de combustíveis sólidos antes da queima, corte da madeira antes do cozimento na produção de celulose.

Na indústria de processamento de alimentos um grande número de produtos é submetido à redução de tamanho. O processo de moagem é utilizado na produção de farinha de trigo e centeio. Sementes oleaginosas são trituradas e prensadas para acelerar a extração do óleo com solventes e produção de farinha. Os moinhos de martelo são usualmente empregados na produção de farinha de mandioca, batata entre outras. O açúcar e sal são moídos para obtenção de um produto mais fino.

1.1 - OBJETIVOS DA REDUÇÃO DE TAMANHO

O processo de Fragmentação de Sólidos também pode ter as seguintes finalidades:

- a) Aumentar as superfícies: (Reações químicas; Extração; Secagem)
- b) Diminuir o tamanho para separar dois ou mais constituintes:
- c) Modificar propriedades de um material: Ex: Reatividade química; Cor (intensidade); especificação de produtos comerciais.
- d) Mistura mais íntima entre dois sólidos: Ex: produtos farmacêuticos em pó.
- e) Auxiliar em outras etapas de utilização do produto

A redução de tamanho pode ajudar outros processos, como o de compressão ou o de extração e pode diminuir o tempo em processos de tratamentos de calor, como branqueando e cocção.

1.2 - MECANISMO DE REDUÇÃO DE TAMANHO

São operações extremamente complexas. Os sólidos podem sofrer redução de tamanho através de vários tipos de solicitações, dos quais quatro são utilizados industrialmente:

1. Compressão;
2. Impacto;
3. Atrito (abrasão);
4. Corte e/ou dilaceramento.

Os equipamentos podem funcionar empregando um ou mais tipos de atuação da força simultaneamente.

Existe uma grande variedade de equipamentos, que podem ser classificados de acordo com o tamanho das partículas de alimentação e do produto.

1 - Britadores: fragmentação de partículas de tamanho grande para médio;

2 - Trituradores: para partículas de tamanhos médios;

3 - Moínhos: redução de partículas médias a pós finos.

O consumo de energia destes equipamentos está relacionado com a estrutura interna do material.

Em termos de tamanhos os sólidos podem ser classificados como:

1. Pós → Partículas de 1 μ m até 0,5 mm
2. Sólidos granulares → Partículas de 0,5 a 10 mm
3. Blocos pequenos → Partículas de 1 a 5 cm.
4. Blocos médios → Partículas de 5 a 15 cm.
5. Blocos grandes → Partículas > 15 cm.

2 - PROPRIEDADES DOS SÓLIDOS A SEREM MOÍDOS

As propriedades mais importantes, além da dimensão dos sólidos, são:

1 - Dureza: afeta o consumo de energia e o desgaste da máquina. Com materiais duros e abrasivos é preciso usar máquina de baixa velocidade e proteger os apoios da poeiras abrasivas formadas. Recomenda-se lubrificação sob pressão. A escala de Mohs mostra a ordem de dureza crescente de alguns sólidos:

Escala de Dureza de Mohs:

- | | |
|-----------------------|-----------------------------|
| 1 - talco | 6 - orthoclase ou feldspato |
| 2 - selenita ou gesso | 7 - quartzo |
| 3 - calcita | 8 - topázio |

4 – flourita
5 – apatita

9 – corindo
10 - diamante

2 – Estrutura: os materiais granulares normais, como carvão, minérios e rochas podem triturar-se eficientemente com o uso das forças normais de compressão, impacto, etc. Para materiais fibrosos é necessário efetuar uma ação de rompimento.

3 – Conteúdo de umidade: verifica-se que os materiais não fluem bem se contiverem de 5 a 50% de umidade; nestas condições, os materiais tendem a se aglutinarem formando bolas. A moagem pode ser satisfatória fora destes limites.

4 – Resistência ao Esmagamento: a potência necessária para o esmagamento é quase que diretamente proporcional à resistência do material ao esmagamento.

5 – Friabilidade: é a sua tendência a fraturar-se durante o manuseamento normal. Em geral, um material cristalino quebrará ao longo de planos bem definidos e a potência necessária pra o esmagamento aumentará à medida que o tamanho da partícula diminui.

6 – Empastamento: um material pegajoso tenderá a entupir o equipamento de moagem e, por isso, deverá ser moído numa instalação que possa ser rapidamente limpa.

7 – Tendência para escorregamento (fluidez): esta característica é, em geral, um reflexo do valor do coeficiente de atrito da superfície do material. Se o coeficiente de atrito for baixo, o esmagamento pode ser mais difícil.

3 – EQUIPAMENTOS

Na Figura 1 são mostrados esquemas de equipamentos de redução de tamanho para a indústria de alimentos. Nos trituradores de rolos (Figura 1a), dois ou mais cilindros de aço giram em sentido contrário de forma que as partículas alimentadas são comprimidas entre eles. O modelo mais conhecido é o de dois rolos lisos, que também podem ser estriados. Os trituradores com rolos estriados são mais versáteis que os de rolos lisos, entretanto possuem limitações quanto ao uso em materiais sólidos muito duros. Os trituradores de rolo são extensamente usados na moagem de trigo e no refino de chocolate.

A Figura 1b mostra um moinho de martelos que opera principalmente por impacto do material com os martelos e com as

placas de britamento, fragmentando materiais frágeis não abrasivos. No rotor há um número de martelos periféricos que basculam em torno de seu ponto de fixação. Os martelos podem ser substituídos por facas, ou outro dispositivo que possibilite o uso em materiais fibrosos ou duros. Pode ser utilizado para materiais fibrosos, como milho, café e soja, pois uma parte da ação de fragmentação é por corte. Podem ser utilizados também para moagem de temperos, leite em pó (dried milk), aglomerados de açúcar, tortas prensadas de cacau, mandioca, frutas secas, vegetais secos e ossos.

Moinhos de discos como os ilustrados na Figura 1c e 1e, utilizam forças de cisalhamento na redução do tamanho das partículas. No moinho de disco (Figura 1c) um dos discos sulcados é fixo e o outro gira em alta velocidade. A distância entre os discos é ajustável, dependendo do tamanho do alimento e das características do produto desejado. No moinho de disco (Figura 1d), os discos giram em direções opostas, proporcionando um maior cisalhamento.

No moinho de rebolo (Figura 1e) a moagem é realizada entre duas pedras horizontais pesadas circulares. Uma das pedras é fixa e a outra gira em torno de seu eixo. O material é alimentado por cima, através de um furo central na pedra superior, sendo moído por atrito entre as duas pedras, cuja superfície é áspera. O produto sai lateralmente por ação centrífuga. Usa-se para moer cereais, pigmentos, produtos farmacêuticos, cosméticos, cortiça e mica. Algumas aplicações são a moagem de trigo, bem como a moagem úmida de milho para remoção do amido. Outras aplicações incluem a quebra de sementes de cacau, a preparação de cacau em pó, a degerminação do milho, produção de farinha de peixe, manufatura de chocolate, moagem de açúcar, noz-moscada, cravo da Índia, amêndoas torradas, pimenta, etc

O moinho de tombamento (*tumbling mill*) (Figura 1f) é um moinho de bolas. O material do cilindro é usualmente aço e as bolas empregadas para moagem podem ser de aço, porcelana ou pedra. O moinho gira sob seu eixo horizontal em uma velocidade baixa. A parte principal do moinho é cilíndrica e a extremidade de saída é cônica afunilando-se no sentido do ponto de descarga. As bolas grandes se reúnem na parte cilíndrica, enquanto que as bolas menores se colocam espontaneamente por ordem decrescente na parte cônica. Assim, o material é moído pela ação de bolas sucessivamente menores. Não se sabe exatamente como ocorre a segregação das bolas de dimensões diferentes, mas sugere-se que, se as bolas estiverem inicialmente misturadas, as grandes atingirão uma velocidade de queda um pouco maior e, por isso, chocam com a superfície inclinada do moinho antes das menores e, em seguida, escorrem para a seção cilíndrica. A capacidade deste moinho é maior do que a de um moinho de bolas de tamanho uniforme e produz um

produto mais fino e mais homogêneo, com um menor consumo de energia. Entretanto, devido à variação de diâmetro é difícil escolher a velocidade ótima de rotação. Entre aplicações na indústria de alimentos, pode ser nomeada a redução da massa líquida de cacau.

Os materiais que produzem poeiras prejudiciais à saúde devem ser moídos sob condições em que não se deixe escapar poeira.

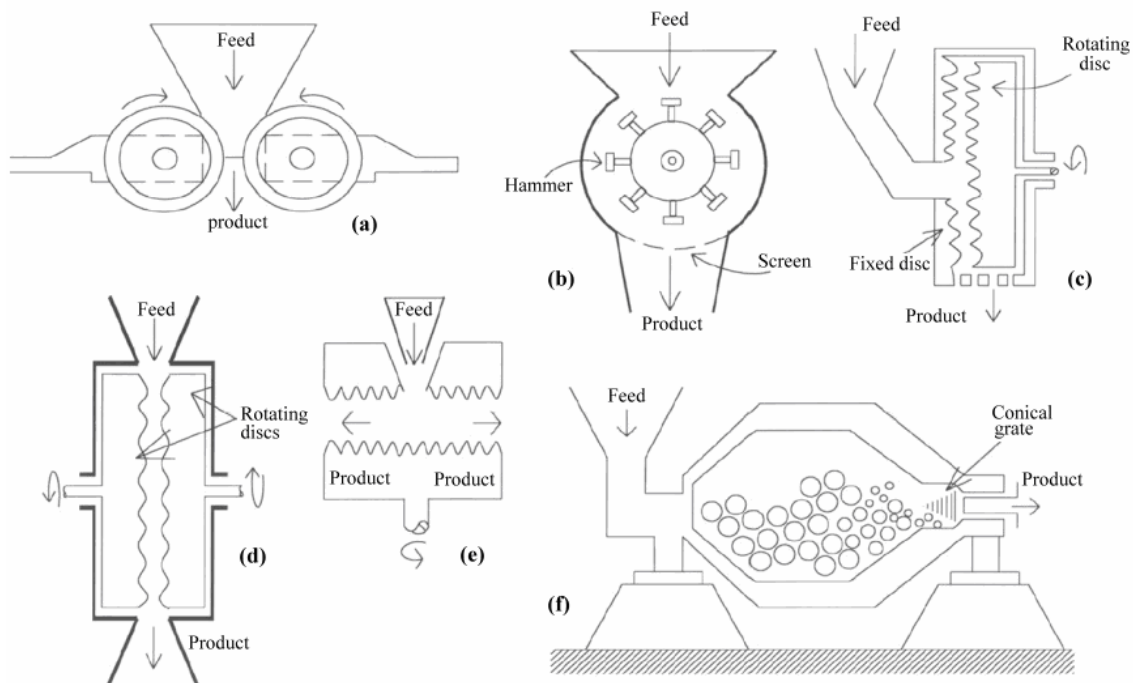


Figura 1: Esquemas de equipamentos de redução de tamanho para a indústria de alimentos

4 - LEIS DE DIVISÃO DE SÓLIDOS

Duas leis empíricas, a de Rittinger e a de Kick, e uma lei semi-teórica mais recente, a de Bond é o que temos para avaliara a energia real de fragmentação de sólidos. As três equações podem ser obtidas para fins didáticos a partir da equação diferencial que relaciona o trabalho elementar necessário para fragmentar a unidade de massa do sólido (dw) com a variação de tamanho (dD).

$$dw = -K \cdot \frac{dD}{D^n} \quad (1)$$

Nesta expressão, n é uma constante que tem um valor para cada lei. Com $n = 1$, temos a lei de Kick. Para $n = 2$ resulta a lei de Rittinger e a lei de Bond considera $n = 1,5$.

A - LEI DE RITTINGER:

A lei de Rittinger pode ser deduzida admitindo-se que a moagem é realizada por cisalhamento.

Considerando uma partícula com diâmetro D_1 , e fator de forma λ_1 (área de superfície da partícula/área de superfície de uma esfera com o mesmo volume), que é moída até o diâmetro D_2 . Se N for o número de partículas formadas a partir da partícula original, a superfície externa adicional produzida pela moagem dessa partícula será:

$$\Delta S = S_2 - S_1 = N(a_2 D_2^2) - a_1 D_1^2 \quad (2)$$

sendo que a_1 e a_2 são os parâmetros de forma da expressão $s = a * D^2$.

Como $N = \frac{b_1 D_1^3}{b_2 D_2^3}$ e o número de partículas de tamanho D_1 na unidade de massa do material é $\frac{1}{b_1 D_1^3 \rho}$, a superfície externa total criada por unidade de massa de alimentação será:

$$\Delta S = \frac{1}{\rho \cdot b_1 D_1^3} \left(\frac{b_1 D_1^3}{b_2 D_2^3} a_2 D_2^2 - a_1 D_1^2 \right) = \frac{\lambda_2}{\rho D_2} - \frac{\lambda_1}{\rho D_1} \quad (3)$$

A energia total consumida será proporcional à variação da energia da superfície durante a operação, isto é:

$$-w = k * e_s \left(\frac{\lambda_2}{\rho D_2} - \frac{\lambda_1}{\rho D_1} \right) \quad (4)$$

Se $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$, resultando a lei de Rittinger:

$$-w = \frac{k * e_s * \lambda}{\rho} \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right) \quad (5)$$

ou

$$-w = K \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right)$$

e, por unidade de tempo:

$$-W = KC \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right) \quad (6)$$

onde:

K - depende do tipo de máquina e do material (obtido experimentalmente em cada situação estudada)
 C - capacidade do britador ou moinho (t/h)
 D - diâmetro da partícula

B - LEI DE KICK:

A lei de Kick pode ser deduzida com base na teoria da análise de tensões durante as deformações do sólido no regime elástico.

A equação pode ser integrada para $n=1$ entre os limites D_1 e D_2 (diâmetros médios inicial e final) resultando na equação de energia consumida por unidade de massa.

$$-w = K * \ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right) \quad (7)$$

sendo que K depende do britador e do material.

Se C é a capacidade do britador, e a relação $(D_1/D_2) = m$ a energia total consumida numa hora será dada pela expressão:

$$-W = K * C * \ln(m) \quad (8)$$

Segundo esta lei, a energia consumida na fragmentação depende de m e não isoladamente de D_1 e D_2 . Assim esta lei só serve para prever as alterações de consumo decorrentes de modificações introduzidas numa operação que já vem sendo realizada.

Aplica-se bem nas primeiras fases do britamento, quando a superfície adicional produzida é relativamente pouco importante.

C - LEI DE BOND:

Substituindo $n=1,5$ na equação 1 e integrando entre os limites D_1 e D_2 temos que:

$$-w = 2K \left(\frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right) \quad (9)$$

Introduzindo a relação da moagem nesta expressão e substituindo a constante $2K$ por $10w_i$ tem-se:

$$-w = w_i \sqrt{\frac{100}{D_2}} \left(1 - \frac{1}{\sqrt{m}} \right) \quad (10)$$

onde:

w_i – é a energia necessária para reduzir a unidade de peso do material desde um tamanho bastante grande até um tamanho no qual 80% do material passe em uma peneira de 100 μ m.

Fazendo $m \rightarrow \infty$ e $D_2 = 100$ na expressão anterior, temos que $-w = w_i$. Este valor é chamado de *work index* (kW.h/t) do material, e varia com a natureza do sólido.

A expressão (11) permite calcular a energia consumida para moer a unidade de massa do sólido. Sendo C a capacidade do moinho (t/h), a energia (-W) pode ser calculada por:

$$-W = k * C * w_i \left(\frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right) \quad (11)$$

sendo que:

D_1 e D_2 – diâmetros médios da alimentação e do produto, respectivamente (cm)

C - capacidade em t/h

w_i – em kW.h/t

k é igual a 1,34 e 1,0 para obter a resposta em HP e kW respectivamente

A lei de Bond pressupõe que todas as partículas têm aproximadamente a mesma forma geométrica.

Tabela - Índice de trabalho para moagem a úmido. Para moagem a seco, multiplicar por 1,34

Material	Massa específica, g/cm ³	Work index, W_i (kW.h/t)
Bauxita	2,20	8,78
Cimento clinquer	3,15	13,45
Cimento bruto	2,67	10,51
Argila	2,51	6,30
Carvão	1,4	13,00
Coque	1,31	15,13
Granito	2,66	15,13
Gesso	2,69	6,73
Minério de ferro	3,53	12,84
Calcáreo	2,66	12,74
Rocha fosfática	2,74	9,92
Quartzo	2,65	13,57

Comparando as três leis apresentadas, a Lei de Bond conduz a estimativas mais realistas dos consumos de energia de britadores e moinhos comerciais. É a única para prever consumo de máquinas que ainda não foram instaladas.

O principal uso destas equações está na comparação das necessidades de potência para vários graus de redução de tamanho de partículas.

Exemplo 01 - Consome-se 30 hp para moer 140 t/h de um material entre 2 mm e 1 mm. Usando a Lei de Rittinger determine a energia necessária para moer 120 t/h do mesmo material entre 1 mm e 0,5 mm ?

$$W^1 = KC_1 \left(\frac{1}{D_2^1} - \frac{1}{D_1^1} \right)$$

$$W^2 = KC_2 \left(\frac{1}{D_2^2} - \frac{1}{D_1^2} \right)$$

$$\frac{W^2}{W^1} = \frac{C_2}{C_1} \left[\frac{\left(\frac{1}{D_2^2} - \frac{1}{D_1^2} \right)}{\left(\frac{1}{D_2^1} - \frac{1}{D_1^1} \right)} \right]$$

$$\frac{W^2}{W^1} = \frac{120}{140} \left[\frac{\left(\frac{1}{0,5} - \frac{1}{1} \right)}{\left(\frac{1}{1} - \frac{1}{2} \right)} \right]$$

$$\frac{W^2}{W^1} = 1,72 \rightarrow W^2 = 51,6hp$$

Exemplo 02 - (Gomide, R; p.98) Fazer uma estimativa da energia necessária para britar 100 t/h de calcário, desde um diâmetro médio de 5 cm até o diâmetro final de 8 mesh Tyler (0,236 cm).

- a) Supor que 80% do peso da alimentação passam por uma peneira de 5 cm de malha e que o produto passa por uma peneira de 8 Mesh Tyler (0,236 cm).
- b) Todas as partículas da alimentação e do produto têm a mesma forma geométrica.
- c) Britamento a seco.

$$-W = k \cdot C \cdot w_i \left(\frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right) = 1,34 \cdot C \cdot w_i \left(\frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right)$$

Lei de Bond: $C = 100 \text{ t/h}$

$$w_i = 12,74 \cdot 1,34 = 17,07 \text{ kW.h/t}$$

$$D_i = 5 \text{ cm}$$

$$D_2 = 0,236 \text{ cm.}$$

$$W = 1,34 \cdot 100 \cdot 17,07 \left(\frac{1}{\sqrt{0,236}} - \frac{1}{\sqrt{5}} \right)$$

$$W = 36,7 \text{ hp}$$

Exemplo 03 - (Gomide, R.; p.99) O britamento da hematita está sendo realizado a úmido numa indústria com um britador intermediário de cilindros lisos. Na operação atual 1/4 hp é consumido para acionar o britador vazio e 14 hp é consumido durante a fragmentação de 6,4 t/h do minério, desde um diâmetro médio de 3 mm a 1 mm. Faça uma estimativa do consumo de energia a ser esperado depois de um ajuste no espaçamento entre os cilindros, de modo a reduzi-lo na metade.

$$W_1 = 14 - 0,25 = 13,75 \text{ hp}$$

a) Lei de Rittinger:

$$W = KC \left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_1} \right)$$

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{KC \left(\frac{1}{0,5} - \frac{1}{3} \right)}{KC \left(\frac{1}{1} - \frac{1}{3} \right)} = 2,5$$

$$W_2 = 2,5 \cdot (14 - 0,25) \rightarrow W_2 \cong 35 \text{ hp}$$

b) Lei de Kick:

$$W = K \cdot C \cdot \ln(m)$$

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{CK \ln \left(\frac{3}{0,5} \right)}{CK \ln \left(\frac{3}{1} \right)} = 1,63$$

$$W_2 = 13,75 \cdot 1,63 \cong 22,4 \text{ hp}$$

c) Lei de Bond: é mais próxima do real.

$$W = K \cdot C \cdot w_i \left(\frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right)$$

$$W_1 = 1,34 C \cdot w_i \left(\frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right)$$

$$W_2 = 1,34 C \cdot w_i \left(\frac{1}{\sqrt{D_2^1}} - \frac{1}{\sqrt{D_1^1}} \right)$$

$$\frac{W_2}{W_1} = 1,98$$

$$W_2 \cong 27,4 \text{ hp}$$

Exemplo 04

O açúcar é obtido a partir de cristais que na alimentação 80% passam pela peneira de 500 μm até um tamanho após moagem no qual 80% passam em uma peneira de 88 μm . Um motor como potência de 5Hp é suficiente para atingir estas especificações para uma determinada carga. As exigências são modificadas para passagem de 80 % na peneira de 125 μm em uma carga 50% maior.

Deseja-se saber se: i) o motor existente possui potência suficiente para operar o moedor.; e ii) qual é o aumento de carga suportado pelo motor.

Obs: Utilize a equação de Bond.

www.nzifst.org.nz/unitoperations/

Res: Potência necessária = 5.4 hp e aumento de carga de 38 %.

Bibliografia consultada.

Earle, R. L. e Earle, M. D. Unit operations in food processing

Gomide, R. Operações Unitárias v 1 Operações com sistemas granulares.

Ortega-Rivas, E. Food Powder Processing, disponível em www.eolss.net