Operações Unitárias I

REDUÇÃO DE DIMENSÕES

Isabel Miranda e Suzana Ferreira-Dias

INSTITUTO SUPERIOR DE AGRONOMIA
Universidade de Lisboa

2019-2020

Redução de dimensões

Objectivos:

a) Facilitar a extracção de um componente

b) Facilitar a solubilização de um componente

c) Facilitar a homogeneização das misturas

d) Aumento da superfície específica de modo a facilitar a transferência de calor e/ou de massa

- **Trituração ou moenda** (sólidos)
- **Emulsionação** (líquidos)

Forças envolvidas na redução de tamanho.

Trituração

Aplicação de esforços

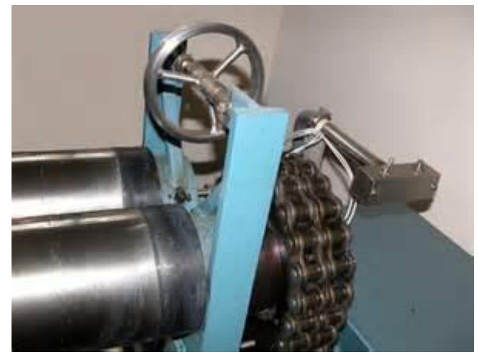
- **Compressão** **(compactação/esmagamento)**
- **Impacto** **(choque)**
- **Atrito superficial**
- **Corte** **por facas**

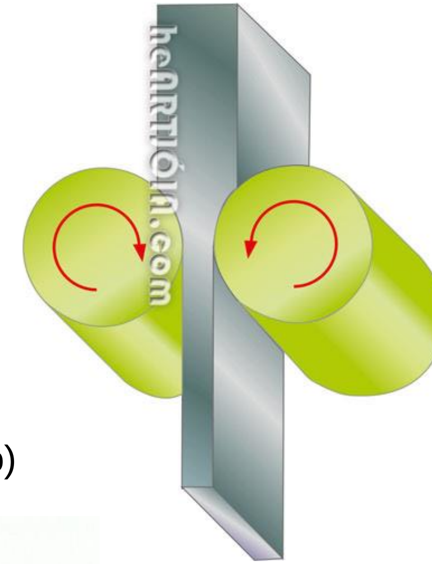
Forças em simultâneo

Fadigas superiores às cargas de rotura

Tipos de Moinhos

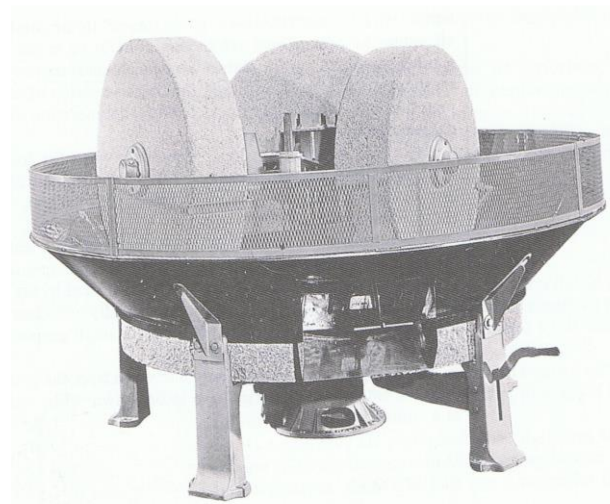
Moinho de
facas (corte)





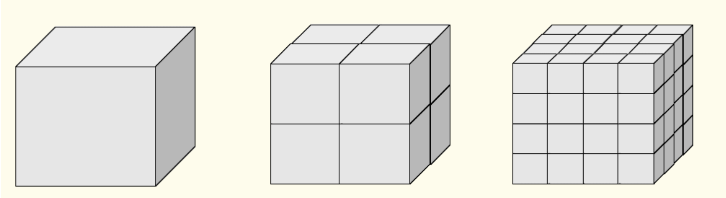
Moinho de rolos (compressão)

Moinho de
martelos
(impacto)



Moinho de galgas cilíndricas (compressão)

Número de reduções necessário



L_i = dimensão inicial das partículas
V_i = volume inicial das partículas
L_f =dimensão final das partículas
V_f = volume final das partículas
n = número de partículas formadas em cada subdivisão = valor fixo
m = número de subdivisões

Admite-se que:

a) a geometria das partículas mantém-se
b) o volume individual das partículas é igual em cada subdivi**são.**

Assim:

$$V_f = \frac{V_i}{n^m} \Leftrightarrow n^m = \frac{V_i}{V_f} \qquad (1)$$

Admitindo (a),

$$\frac{V_i}{V_f} = \frac{L_i^3}{L_f^3} \qquad (2)$$

De (1), **temos que:**

$$n^m = \frac{L_i^3}{L_f^3} \Leftrightarrow \boxed{m = \frac{3}{\log n} \cdot \log \frac{L_i}{L_f}} \qquad (3)$$

Consumo de energia na trituração

Um sólido ao ser fragmentado é primeiro **deformado** e o trabalho necessário é armazenado temporariamente no sólido sob a forma de **energia mecânica de deformação**, ou seja, fica num estado de tensão até que, quando a deformação atinge o **limite de rotura do material**, ele sofre fractura e dá origem a fragmentos de menores dimensões.

Forma-se uma nova superfície.

Eficiência da Trituração (η_c)

Pela lei de conservação da energia, toda a energia de deformação, para além da que é necessária como energia para a formação da nova superfície, deve libertar-se sob a forma de calor.

Eficiência de trituração

η_c = razão entre a energia de superfície criada pela trituração (e_s) e a energia absorvida pelo sólido (W_n)

$$W_n = \frac{e_s\left(A_{wb} - A_{wa}\right)}{\eta_c}$$

(η_c muito baixa 0,1 -2 %)

W_n = energia realmente utilizada (energia absorvida por unidade de massa)
η_c = eficiência de trituração
e_s = energia superficial por unidade de área
A_{wa} = área de superfície da alimentação
A_{wb} = área de superfície do produto final

A energia de superfície criada pela fractura é pequena em comparação com a energia mecânica total armazenada no material na altura da fractura pelo que a conversão em calor é elevada. Os valores da eficiência de trituração são baixos (valores de 0,1 a 2%)

Eficiência mecânica (η_m)

A energia total absorvida pelo sólido é menor do que a energia fornecida ao moinho. Da energia total (W), parte é utilizada para vencer o atrito nos rolamentos e outras partes móveis

Eficiência mecânica (η_m) = razão entre a energia absorvida pelo sólido e a energia absorvida pela máquina

$$W = \frac{W_n}{\eta_m} = \frac{e_s\left(A_{wb} - A_{wa}\right)}{\eta_m\,\eta_c}$$

W = energia total
W_n= energia realmente utilizada
η_m = eficiência mecânica

Se m for o caudal mássico da alimentação, a potência da máquina (P)

$$P = W \cdot \dot{m} \quad \Rightarrow \quad P = \frac{m e_s (A_{wb} - A_{wa})}{\eta_c \eta_m}$$

Calculando A_{wa} e A_{wb} e substituindo na equação

$$P = \frac{6 m e_s}{\eta_c \eta_m \rho_p} \left(\frac{1}{\varphi_b \overline{\overline{D_{wb}}}} - \frac{1}{\varphi_a \overline{\overline{D_{wa}}}} \right)$$

$$\boxed{A_W = \frac{6}{\phi_s \rho_p D_p}}$$

P = potência da máquina
m = caudal mássico da alimentação
A_{wa} e A_{wb} = área de superfície da alimentação do produto final, respectivamente
D_{wa} e D_{wb} = diâmetro médio volume-superfície da alimentação e do produto
η_c e η_m = eficiência de trituração e eficiência mecânica
ϕ_a e ϕ_b = esfericidade da alimentação e do produto
ρ = massa volúmica

CONSUMO ENERGÉTICO

Trituração:⇒ operação de eficiência muito baixa (≈ 2%) porque grande parte da energia consumida é dissipada sob a forma de calor.

Existe um modelo geral para explicar o fenómeno da redução de tamanho. A partir dele vários investigadores desenvolveram leis para predizer a potência necessária. Leis de Rittinger, Kick e Bond

MODELO GERAL

A energia necessária (***E***) para produzir uma modificação ***dL*** numa partícula de tamanho ***L*** é uma função de ***L*** elevada a uma certa potencia ***n***.

$$\boxed{\frac{dE}{dL} = -\frac{K}{L^n}} \qquad (4)$$

onde:

L é a dimensão característica da partícula,

n e ***K*** são constantes que dependem do tipo de material e do tipo de equipamento.

Integrando a equação

$$\int_0^E dE = -K \int_{L_1}^{L_2} \frac{dL}{L^n}$$

Obtemos a expressão do modelo geral

$$\boxed{E = \frac{K}{n-1}\left(\frac{1}{L_2^{n-1}} - \frac{1}{L_1^{n-1}}\right)}$$

onde:

L_1 = diâmetro médio da matéria-prima

L_2= diâmetro médio do produto

E = consumo energético do moinho

Lei de Kick (1885)

Kick assume a partir de observações experimentais que ***n = 1***

$$-\int_0^E dE = -K\int_{L_i}^{L_f}\frac{dL}{L} \quad\rightarrow\quad -E = -K\ln\left(\frac{L_f}{L_i}\right) \quad\rightarrow\quad -E = K\ln\left(\frac{L_i}{L_f}\right)$$

$$\boxed{E = K\ln\left(\frac{L_i}{L_f}\right)} \qquad (5)$$

onde:

L_i = diâmetro médio da matéria-prima

L_f = diâmetro médio do produto

E = consumo energético do moinho

K = **constante de proporcionalidade** = $K_k \cdot f_c$

K_K = constante de Kick

f_c = resistência da substância à trituração

O trabalho necessário para fragmentar um sólido é uma função logarítmica da razão entre os tamanhos inicial e final dos fragmentos (L_i / L_f)

$$\frac{L_i}{L_f} = constante \Rightarrow E = const, \forall L_i$$

Esta lei mostra que é necessária a mesma quantidade de energia para reduzir um material de 100 mm a 50 mm como para reduzir o mesmo material de 50 mm a 25 mm

Lei de Rittinger (1867)

Rittinger propôs uma lei na qual o trabalho necessário para a trituração é proporcional à nova superfície criada $\Rightarrow$ ***E*** é proporcional à área formada $\rightarrow$ ***n=2***

$$dE = -K\frac{dL}{L^2} \longrightarrow \boxed{E = K\left(\frac{1}{L_f} - \frac{1}{L_i}\right)} \qquad (6)$$

K = **constante de proporcionalidade =** $K_R \cdot f_c$

K_R = constante de Rittinger

f_c = resistência da substância à trituração

Esta lei considera que a quantidade de energia necessária para reduzir um material de 100 mm a 50 mm é diferente do obtido ao reduzir de 50 a 25 mm. Seria equivalente a redução do material de 50 mm a 33.3 mm.

Conclusões:

- Para o mesmo grau de moenda $\Rightarrow$ $\boldsymbol{E_{Rittinger} > E_{Kick}}$

- Experimentalmente verifica-se que:

Equação de Kick $\rightarrow$ boa aproximação para as triturações grosseiras

Equação de Rittinger $\rightarrow$ trituração fina (há um aumento considerável da superfície específica)

Lei de Bond **(1952)**

O trabalho necessário para a trituração é proporcional à raiz quadrada da razão S_p/V_p do produto obtido →**n = 1,5**

como: $$\frac{S_p}{V_p} = \frac{6}{\phi_s D_p} \qquad (7)$$

⇒Da equação $\frac{dE}{dL} = -\frac{K}{L^n}$ e substituindo a dimensão L por D_p

$$\boxed{E = \frac{K_B}{\sqrt{D_p}}} \qquad (8)$$

K_B = constante de Bond, depende do moinho e do material a triturar

Utilização da equação de Bond $\Rightarrow$ definir **índice de trabalho (W_i)**

W_i = energia bruta, em kW.h/t de alimentação, para reduzir as partículas de grandes dimensões da alimentação a partículas de modo a que 80 % do produto passe por um crivo de 100μm.

$$\Rightarrow \qquad K_b = \left(\sqrt{100\times10^{-3}}\right)\cdot W_i = 0{,}3162\cdot W_i \qquad (9)$$

(considerando $\boldsymbol{D_p}$ em mm; $\boldsymbol{E}$ em kW.h/ton)

Se 80% da alimentação passa um crivo de abertura D_{pa} (mm) e 80 % do produto passa um crivo de abertura D_{pb} (mm), então pelas equações (8) e (9):

$$\boxed{\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{P}}{\boldsymbol{m}} = 0{,}3162\,\boldsymbol{W_i}\left(\frac{1}{\sqrt{\boldsymbol{D_{pb}}}}-\frac{1}{\sqrt{\boldsymbol{D_{pa}}}}\right)}$$

$\boldsymbol{P}$ = potência da máquina [kW]
$\boldsymbol{m}$ = caudal mássico da alimentação [ton/h]
$\boldsymbol{D_p}$ = dimensões das partículas [mm]

Valores de índices de trabalho para alguns materiais

Material	W_i [kW .h/ton]
Bauxite	8,78
Cimento	10,51
Carvão	13,00
Brita	16,06
Fosfato	9,92
Quartzo	13,57
Granito	15,13
Pedra calcária	12,74

Problema 1:

Para reduzir uma determinada quantidade de produto, cujas partículas têm a dimensão média de 6 mm, até à dimensão média de 2 mm (mesh 10), consumiram-se 7,5 kW.h.

Qual o consumo de energia se se pretender atingir uma dimensão de 0,842 mm (mesh 20)?.

Problema 2:

Qual a potência necessária para triturar 100 ton/h de pedra calcária se 80% da alimentação passar por um crivo de 2" e 80% do produto num crivo de 1/8" ?

m = 100 ton/h

D_{pa} = 2 x25,4 = 50,8 mm

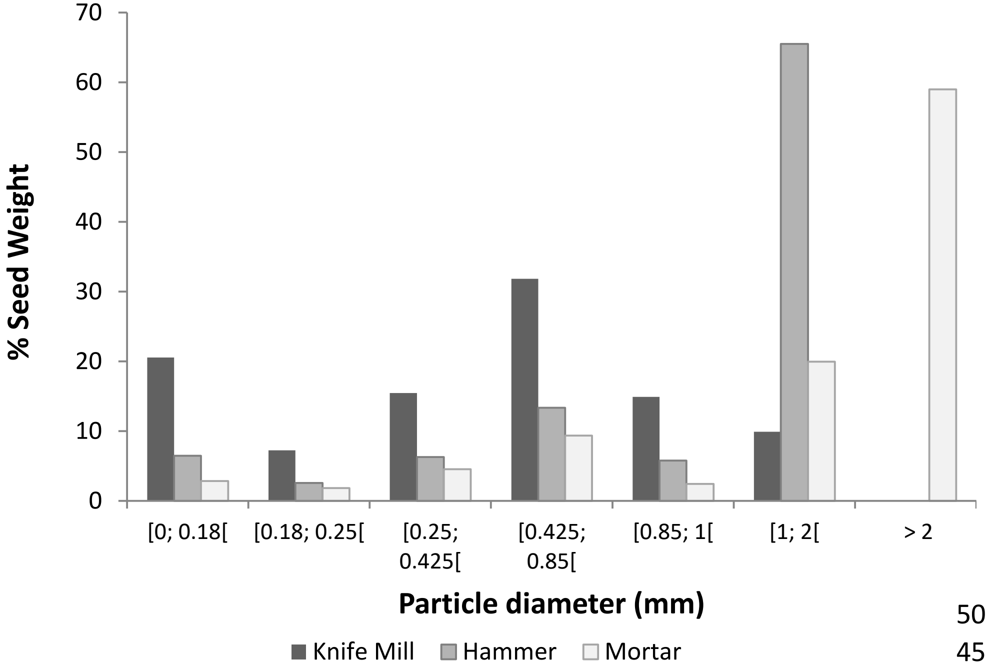
D_{pb} = 0,125 x 25,4 = 3,175 mm

W_i= 12,74

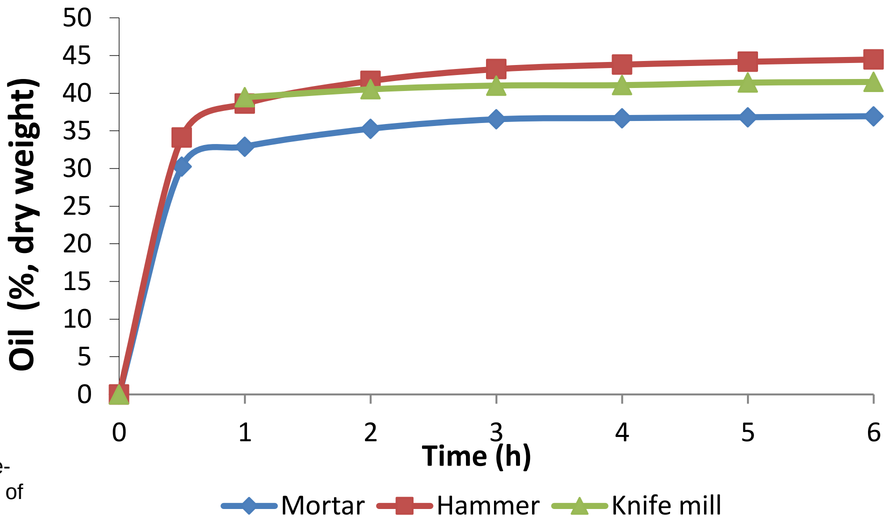
$$\boldsymbol{E} = \frac{\boldsymbol{P}}{\boldsymbol{m}} \Rightarrow \boldsymbol{P} = \boldsymbol{E} \cdot \boldsymbol{m} = 0{,}3162 \boldsymbol{W_i} \left(\frac{1}{\sqrt{\boldsymbol{D_{pb}}}} - \frac{1}{\sqrt{\boldsymbol{D_{pa}}}} \right)$$

$$P = 100 \times 0{,}3162 \times 12{,}74 \left(\frac{1}{\sqrt{3{,}175}} - \frac{1}{\sqrt{50{,}8}} \right) = 169{,}6 kW$$

Influência do tipo de moinho, granulometria no rendimento de extracção de óleo de sementes de *Jatropha curcas* L.



- A distribuição de dimensões de partículas depende do tipo de moinho
- O rendimento da extracção por solvente de sementes de Jatropha varia com o tipo de moinho utilizado na sua trituração.



Rodrigues, J. Miranda, I., Gominho, J., Vasconcelos, M., Barradas, G., Pereira, H., Bianchi-de-Aguiar, F., Ferreira-Dias, S. (2016) Modeling and optimization of laboratory-scale conditioning of *Jatropha curcas* L. seeds for oil expression, Ind. Crops Prod. 83: 614-619