

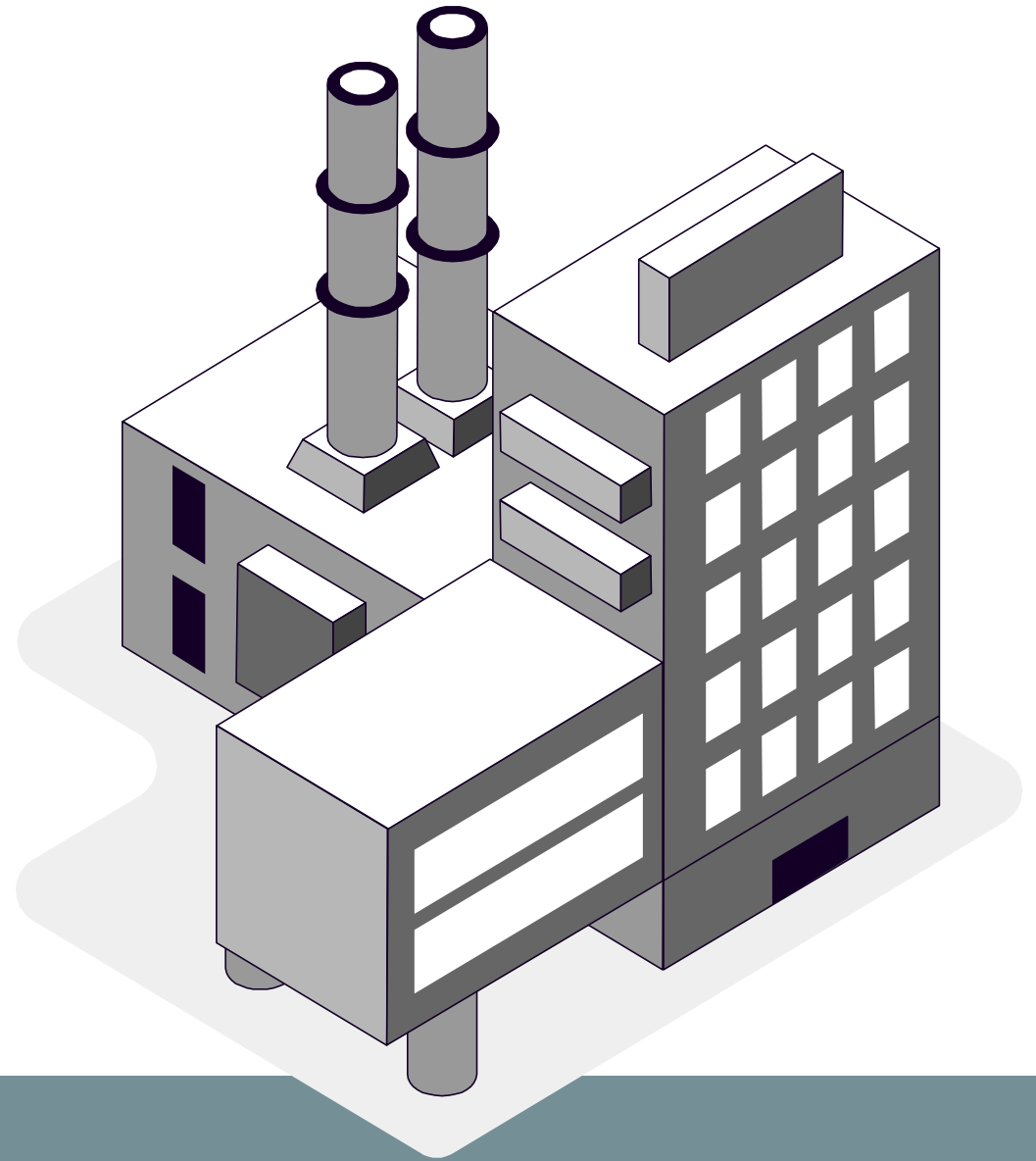
# OPERAÇÕES UNITÁRIAS I

PROF<sup>a</sup> KASSIA G SANTOS

2020/1- CURSO REMOTO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA

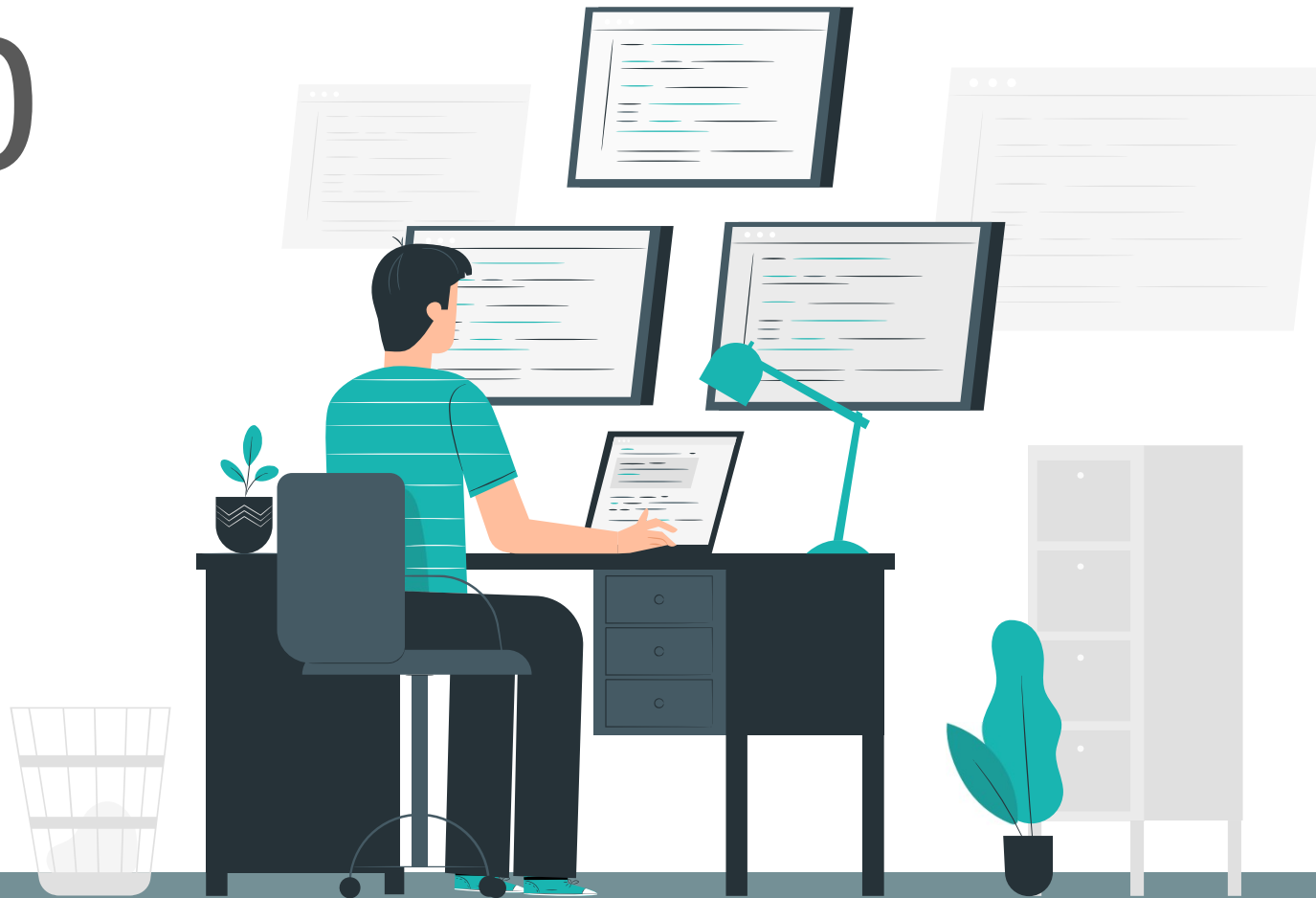
UFTM



# AULA 10

## 5. Cominuição

### 5.1 Introdução



# Fundamento Teórico da Cominuição (ou fragmentação de partículas)

**Conjunto de operações de redução de tamanhos de partículas (como por exemplo minérios), executado de maneira controlada, e de modo a cumprir objetivos pré-determinados.**

Constitui basicamente de duas etapas principais:

**Britagem**

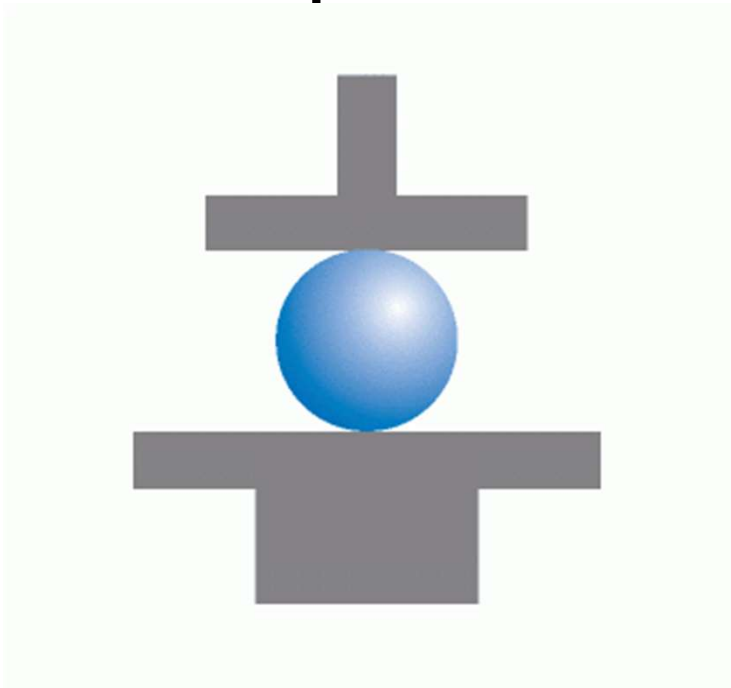
**Moagem**

## Principais Objetivos da Cominuição:

- a) Permitir manuseio do material e seu transporte contínuo (Ex: pedaço de rocha muito volumoso e pesado para ser transportado por caçambas, e transportadores de correia)
- b) Facilitar a separação de um constituinte desejado, contido numa estrutura mais complexa (separar a ganga do minério bruto);
- c) Aumentar a área superficial dos sólidos para aumentar a velocidade de alguns processos, tais como: redução no tempo de secagem, extração de solúveis e reações químicas, etc.
- d) Aumentar a efetividade na mistura de partículas (Ex: Fertilizante em pó);
- e) Melhorar a comercialização de produtos (uniformidade de tamanho e forma).  
Ex: Produtos alimentícios e minerais.

# Princípios físicos da redução de tamanho de sólidos

## Compressão



Esmagamento grosseiro  
de materiais duros

## Impacto



Usados na moagem  
grosseira, média e fina

## Cisalhamento



Para materiais menos duros,  
não abrasivos, moagem fina

**Considerar:**

DUREZA

ESTRUTURA  
MECÂNICA

TEOR UMIDADE

SENSIBILIDADE  
TÉRMICA

# Diferenças entre as operações de Britagem e Moagem

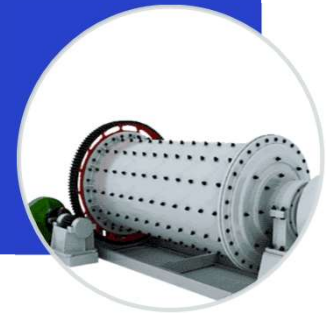
- Partículas grosseiras
- Forças de compressão e de impacto.
- Baixas relações de redução de tamanho
- À seco
- A operação deve ser repetida diversas vezes, mudando-se o equipamento, até obtenção de material adequado à moagem.

## Britagem:

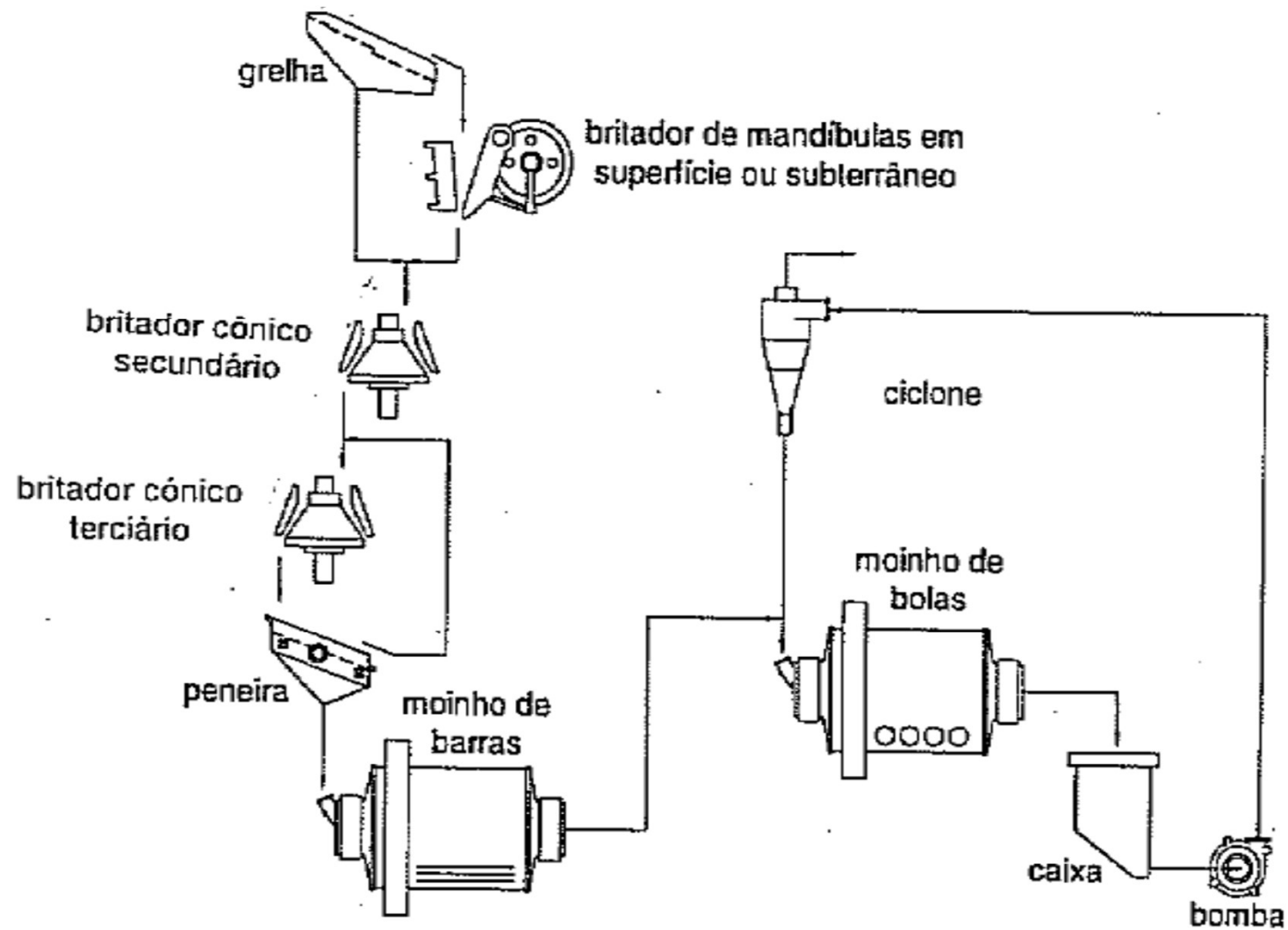


- Partículas finas
- Processos de abrasão e arredondamento (quebra de arestas).
- Maiores relações de redução de tamanho
- Preferencialmente à úmido, para facilitar transporte e evitar formação de poeiras

## Moagem



# CIRCUITO CLÁSSICO DA COMINUIÇÃO



# CONSUMO ENERGÉTICO NA COMINUIÇÃO

Os custos de energia são o principal gastos em trituração (ou britamento) e moenda, de maneira que os fatores que controlam esses custos são importantes.

O sólido a ser fragmentado inicialmente sofre deformação e fica em estado de tensão até que, ultrapassando o limite de ruptura, as partículas se rompem.

**“O trabalho necessário para fragmentar o sólido é proporcional ao aumento de superfície produzido”**

As leis de **Kick**, **Rittinger** e **Bond** são leis empíricas que podem ser obtidas a partir de uma equação diferencial que relaciona o trabalho elementar necessário ( $-dW$ , trabalho fornecido) para fragmentar a unidade de massa do sólido com uma variação de tamanho ( $-dD$ , redução de tamanho ou diâmetro médio).

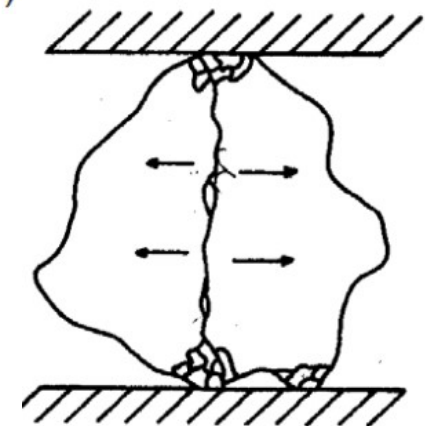
$$-dW = k \left( \frac{-dD}{D^n} \right)$$

Portanto:

Lei de Kick:  $n = 1$  (primeiras fases do britamento)

Lei de Rittinger:  $n = 2$  (moagem fina)

Lei de Bond:  $n = 1,5$  ( geral)





## Lei de Rittinger (n=2)

A mais antiga dessas relações, diz :

**“A área da nova superfície produzida por fragmentação é diretamente proporcional ao trabalho útil consumido”.**

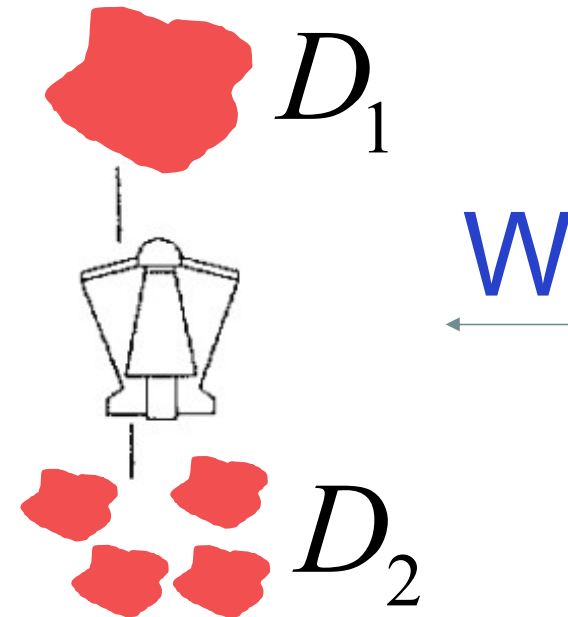
Aplicada moagem fina

$$-\int_0^W dW = -k \int_{D_1}^{D_2} \frac{dD}{D^2}$$



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

1ª Lei da Cominuição



## Lei de Kick (n=1)

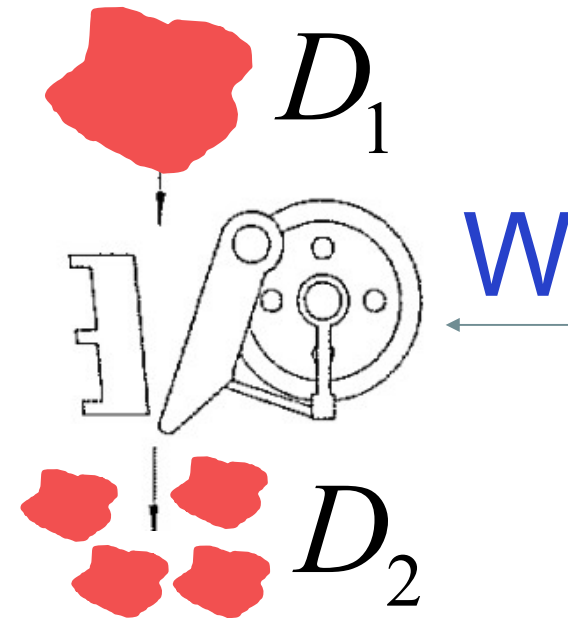
Aplicada às primeiras fases do britamento, quando as modificações de extensão superficial não são importantes

$$-\int_0^W dW = -k \int_{D_1}^{D_2} \frac{dD}{D}$$



$$-W = Ck \ln\left(\frac{D_1}{D_2}\right)$$

2ª Lei da Cominuição



## Lei de Bond (n=1,5)

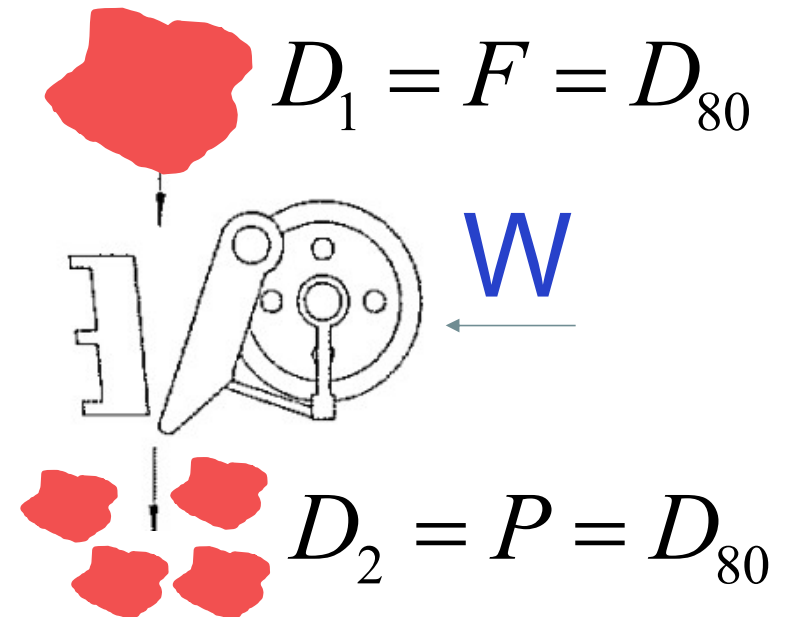
$$-\int_0^W dW = -k \int_{D_1}^{D_2} \frac{dD}{D^{1,5}}$$

↓

$$-W = Ck W_i \left( \frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right)$$

3ª Lei da Cominuição

**A energia consumida para reduzir o tamanho de um material é inversamente proporcional à raiz quadrada do tamanho”**



$W_i$  é um índice de trabalho do material (tabelado), definido como o trabalho necessário para reduzir a unidade de peso (tonelada curta = 907 kg) do material, desde um tamanho inicial  $D_2$ , até uma granulometria 80% passante em 100  $\mu\text{m}$

Se  $W$  for dado em HP,  $C$  em ton/h e  $D$  em cm e  $W_i$  em kWh/ton, então  $k=0,134$

# EXÉRCÍCIOS DE CONSUMO ENERGÉTICO EM BRITADORES E MOINHOS



**EX17: (Gomide, pg98)** Fazer uma estimativa da energia necessária para britar 100t/h de calcário, desde um diâmetro D80=5cm até o diâmetro final de 8 mesh (D80=0,236 cm). (Britagem a seco)

**Dados:**

Alimentação  
D1= 5cm

Produto  
D2=0,236 cm

C=100 t/h

Wi=? A seco

W

Pela Lei de Bond:

$$-W = 0,134CW_i \left( \frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right)$$

$$W_i = 12,74 \cdot 1,34 = 17,07 kWh / t$$

*Tabela III-15*  
ÍNDICES DE TRABALHO PARA MOAGENS A ÚMIDO (kWh/t)  
PARA MOAGENS A SECO MULTIPLICAR POR 1,34

| Material             | Densidade | Índice de trabalho |
|----------------------|-----------|--------------------|
| Argila               | 2,51      | 6,30               |
| Ardosia              | 2,57      | 14,30              |
| Areia                | 2,65      | 16,46              |
| Barita               | 4,28      | 6,24               |
| Bauxita              | 2,20      | 8,78               |
| Basalto              | 2,89      | 20,41              |
| Blenda               | 3,68      | 12,42              |
| Calcáreo             | 2,66      | 12,74              |
| Carbureto de silício | 2,73      | 26,17              |
| Cascalho             | 2,63      | 15,87              |
| Carvão               | 1,40      | 13,00              |
| Cimento              | 2,67      | 10,57              |
| Clinker              | 3,09      | 13,49              |
| Coque                | 1,31      | 15,13              |

**EX17: (Gomide, pg98)** Fazer uma estimativa da energia necessária para britar 100t/h de calcário, desde um diâmetro D80=5cm até o diâmetro final de 8 mesh (D80=0,236 cm). (Britagem a seco)

**Dados:**

Alimentação

D1= 5cm

Produto

D2=0,236 cm

C=100 t/h

Wi=? A seco

-W=???

Pela Lei de Kick

$$-W = 0,134CW_i \left( \frac{1}{\sqrt{D_2}} - \frac{1}{\sqrt{D_1}} \right)$$

$$W_i = 12,74 \cdot 1,34 = 1707 kWh / t$$

$$-W = 0,134 \cdot 100 \frac{t}{h} \cdot 17,07 \frac{kWh}{t} \left( \frac{1}{\sqrt{0,236}} - \frac{1}{\sqrt{5}} \right) = 368 HP$$

### EX18: (Gomide, pg99) Britagem de hematita à úmido.

A operação é feita em britador de ciclindros lisos. Atualmente gasta-se 1/4HP com britador vazio e 14HP para britar 6,4t/h com  $D_1=3\text{mm}$  até  $D_2=1\text{ mm}$ . Se reduzir o espaçamento dos cilindros pela metade, quanto será gasto de energia? Faça estimativa pelas 3 Leis da cominuição.

#### Dados:

Alimentação

$D_1= 0,3\text{cm}$

Produto

$D_2=0,1\text{ cm}$

$C=6,4\text{ t/h}$

$W_i=?$  (úmido)

$-W^*=14-0,25=13,75\text{HP}$

$-W^{**}=???$

$D_2^{**}=0,05\text{cm}$

Pela Lei de Rittinger:

$$\frac{-W^{**}}{-W^*} = \frac{Ck(1/D_2^{**} - 1/D_1^{**})}{Ck(1/D_2^* - 1/D_1^{**})} = \frac{(1/D_2^{**} - 1/D_1^{**})}{(1/D_2^* - 1/D_1^*)}$$

$$-W^{**} = -W^* \frac{(1/D_2^{**} - 1/D_1^{**})}{(1/D_2^* - 1/D_1^*)}$$

$$-W^{**} = 13,75 \frac{(1/0,05 - 1/0,3)}{(1/0,1 - 1/0,3)} = 34,4\text{HP} \approx 35\text{HP}$$

### EX18: (Gomide, pg99) Britagem de hematita à úmido.

A operação é feita em britador de ciclindros lisos. Atualmente gasta-se 1/4HP com britador vazio e 14HP para britar 6,4t/h com  $D_1=3\text{mm}$  até  $D_2=1\text{ mm}$ . Se reduzir o espaçamento dos cilindros pela metade, quanto será gasto de energia? Faça estimativa pelas 3 Leis da cominuição.

#### Dados:

Alimentação

$D_1= 0,3\text{cm}$

Produto

$D_2=0,1\text{ cm}$

$C=6,4\text{ t/h}$

$W_i=?$  (úmido)

$-W^*=14-0,25=13,75\text{HP}$

$-W^{**}=???$

Pela Lei de Kick:

$$\frac{-W^{**}}{-W^*} = \frac{kC \ln(D_1^{**} / D_2^{**})}{kC \ln(D_1^* / D_2^*)} = \frac{\ln(D_1^{**} / D_2^{**})}{\ln(D_1^* / D_2^*)}$$

$$-W^{**} = -W^* \frac{\ln(D_1^{**} / D_2^{**})}{\ln(D_1^* / D_2^*)}$$

$$-W^{**} = 13,75 \frac{\ln(3 / 0,5)}{\ln(3 / 1)} = 22,4\text{HP} \approx 23\text{HP}$$



### EX18: (Gomide, pg99) Britagem de hematita à úmido.

A operação é feita em britador de ciclindros lisos. Atualmente gasta-se 1/4HP com britador vazio e 14HP para britar 6,4t/h com  $D_1=3\text{mm}$  até  $D_2=1\text{ mm}$ . Se reduzir o espaçamento dos cilindros pela metade, quanto será gasto de energia? Faça estimativa pelas 3 Leis da cominuição.

#### Dados:

Alimentação

$D_1= 0,3\text{cm}$

Produto

$D_2=0,1\text{ cm}$

$C=6,4\text{ t/h}$

$W_i=?$  (úmido)

$-W^*=14-0,25=13,75\text{HP}$

$-W^{**}=???$

Pela Lei de Bond:

$$\frac{-W^{**}}{-W^*} = \frac{0,134CW_i \left( 1/\sqrt{D_2^{**}} - 1/\sqrt{D_1^{**}} \right)}{0,134CW_i \left( 1/\sqrt{D_2} - 1/\sqrt{D_1} \right)} = \frac{\left( 1/\sqrt{D_2^{**}} - 1/\sqrt{D_1^{**}} \right)}{\left( 1/\sqrt{D_2} - 1/\sqrt{D_1} \right)}$$

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

$$-W^{**} = 13,75 \frac{\left( 1/\sqrt{0,05} - 1/\sqrt{0,3} \right)}{\left( 1/\sqrt{0,1} - 1/\sqrt{0,3} \right)} = 27,2\text{HP} \approx 28\text{HP}$$

## Atividades da Aula 10

### Individual:

- ☐ Ler sobre : Princípios de Fragmentação, no livro “Tratamentos de Minérios, 5ª Ed.”
- ☐ Refaça os exercícios.

### Empresa

- ☐ Baixar catálogos de britadores e moinhos
- ☐ Colocar no site da empresa vídeos sobre tipos e princípio de funcionamento de britadores e moinhos
- ☐ Atualizar o site com vídeos de elutriadores
- ☐ Finalizar Projeto Orientado de Elutriadores

