

Curso de especialização em tratamento de minérios

Cominuição

Fundamentos

Catalão – 26 de Outubro de 2012

Professor Mauricio Guimarães Bergerman

ETAPAS DE PROCESSAMENTO ENVOLVENDO SÓLIDOS PARTICULADOS

- Preparação:

- ▣ Cominuição e classificação;

- Concentração:

- ▣ Métodos densitários;

- ▣ Flotação;

- ▣ Separação magnética e eletrostática;

- ▣ Outros: separação óptica (ore sorting).

- Desaguamento:

- ▣ Espessamento, filtração e secagem.

- Transporte

Para casa!



- Texto sobre continuação do livro Mineral Processing Technology – Barry Wills e Tim Nappier-Munn. 2006.

Cominuição

Cominuição (comminuere – fazer menor) = redução controlada de tamanho

Objetivos: manuseio, permitir transporte contínuo, atender especificações de mercado, liberar as espécies minerais.

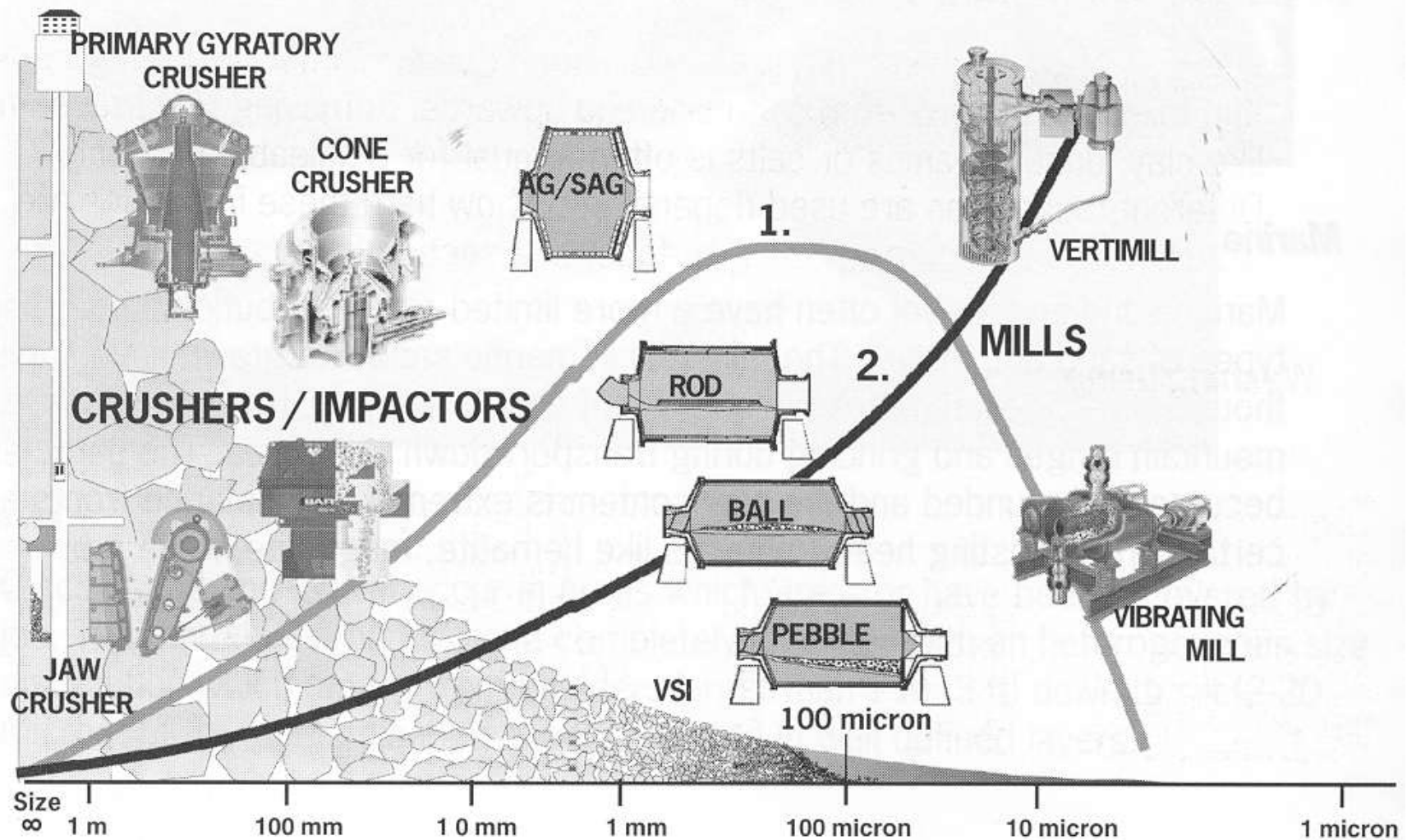
BRITAGEM: **principalmente** compressão e impacto

tamanhos maiores, separação de tamanhos por peneiramento, geralmente feita a seco

MOAGEM: **principalmente** impacto, atrição e abrasão

tamanhos menores, separação de tamanhos por classificação, preferencialmente feita a úmido

Cominuição



Cominuição - mecanismos

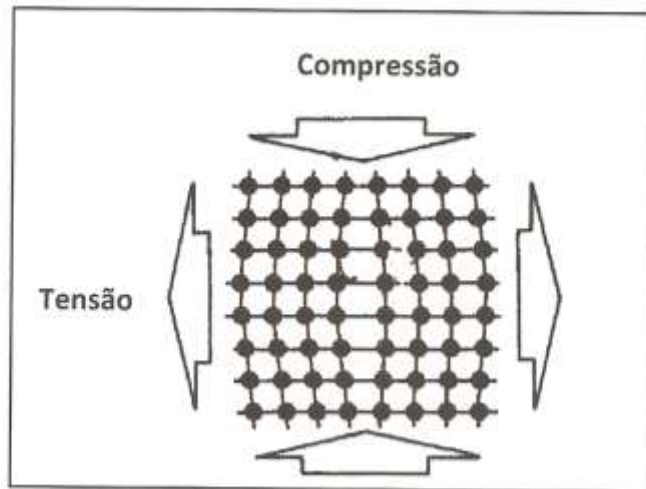


Figura 1 – Deformação de um cristal sujeito a compressão e tensão⁽³⁾.

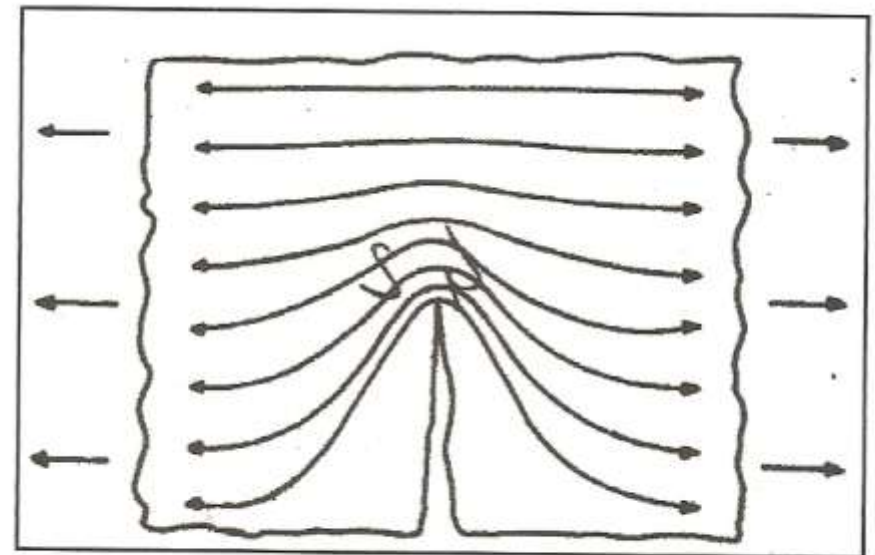


Figura 2 – Concentração de esforços numa fenda⁽³⁾.

Cominuição - mecanismos

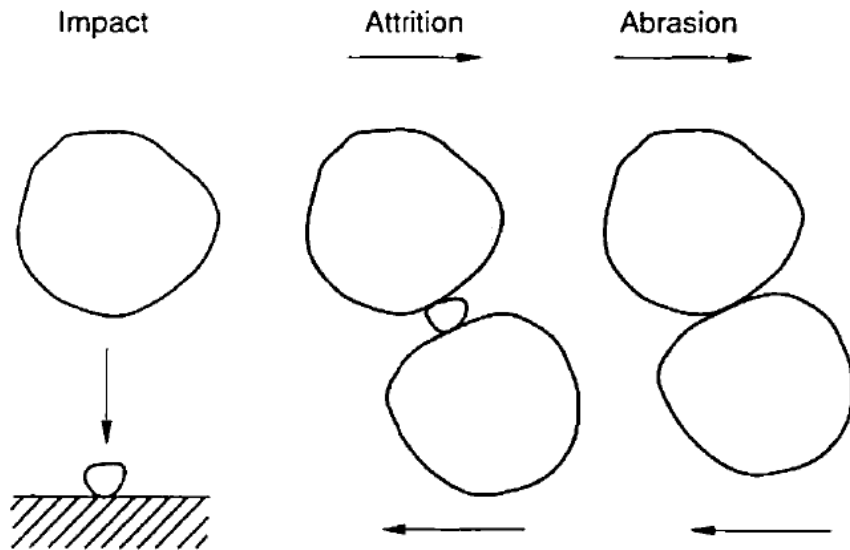


Figure 7.9: Principal breakage mechanisms

;Fonte: nappier-munn 1999

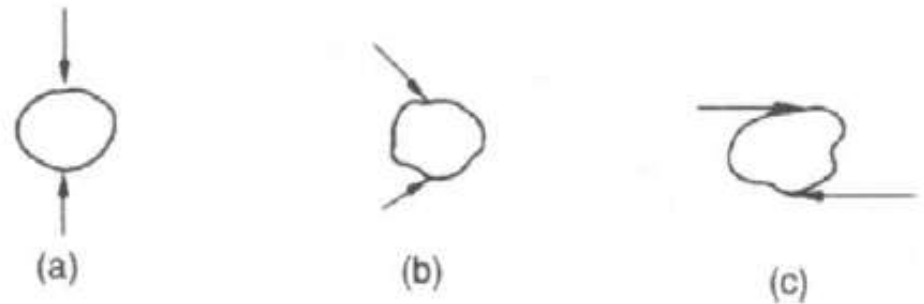


Figure 7.1 Mechanisms of breakage: (a) impact or compression, (b) chipping, (c) abrasion

;Fonte: Wills 2006

Cominuição - mecanismos

117

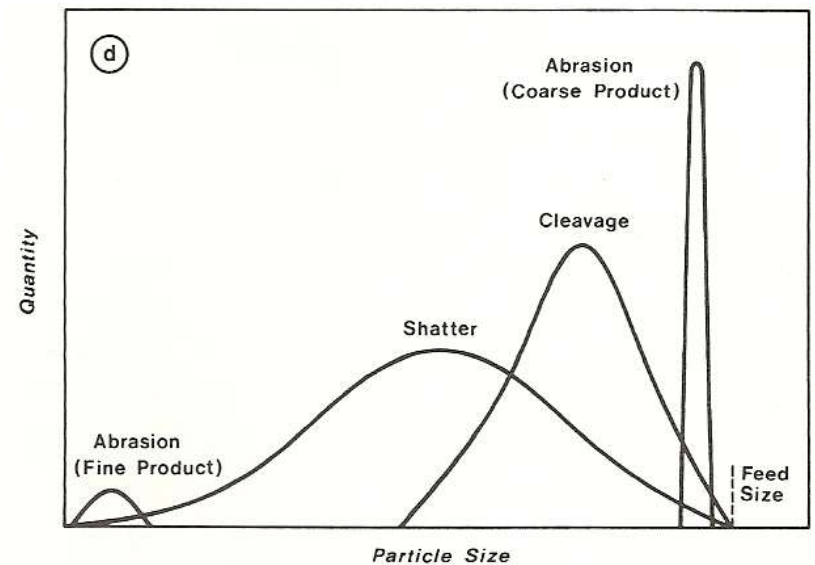
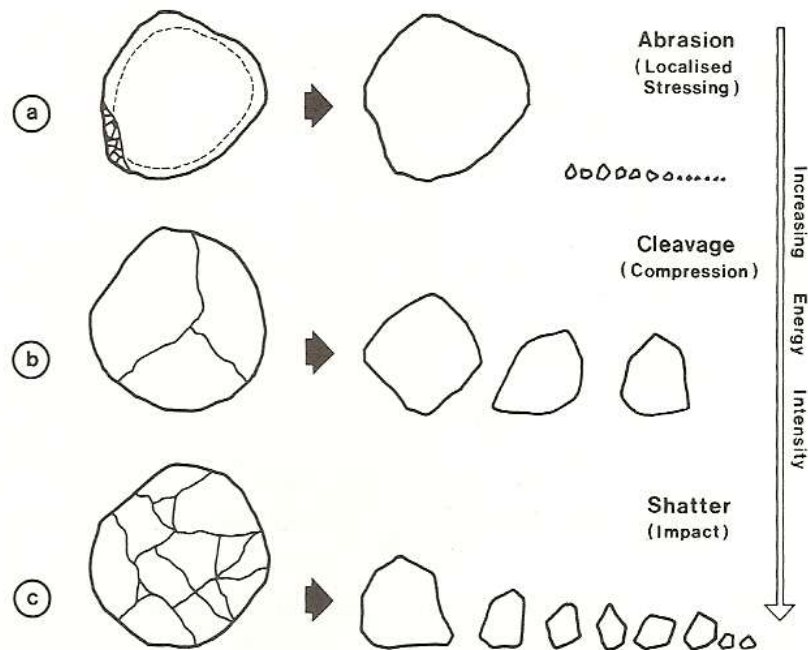


Figure 7.4. Representation of the mechanisms of particle fracture and the resulting product size distributions.

Cominuição - mecanismos

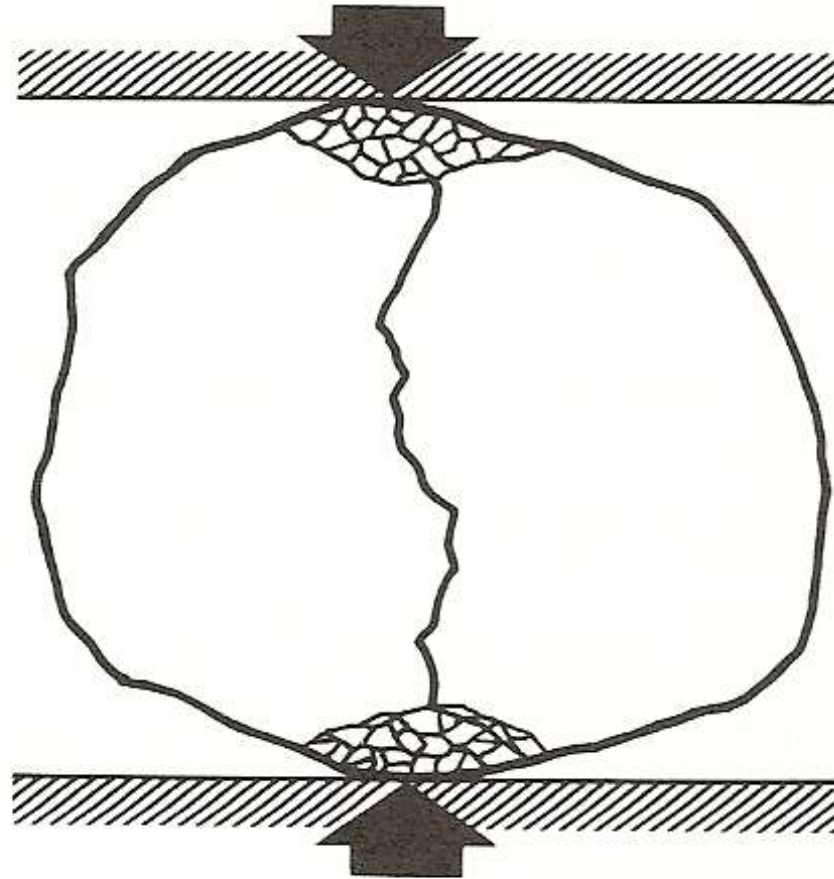


Figure 7.5. Combination of fracture mechanisms, as occurs in practice.

Cominuição – estimativa de consumo energético

Rittinger, Alemanha, 1867: a energia dispendida é proporcional à nova superfície gerada.

$$E = k_1 \cdot (1/P - 1/F)$$

Kick, EUA, 1885: a energia dispendida é proporcional à relação de redução.

$$E = k_2 \cdot \ln (F/P)$$

100 anos de discussões infrutíferas – até

Bond, 1952, Allis Chalmers, EUA:

$$E = k_3 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)$$

$$k_3/10 = \text{“work index”} = WI$$

Cominuição – estimativa de consumo energético

As três teorias podem ser representadas por

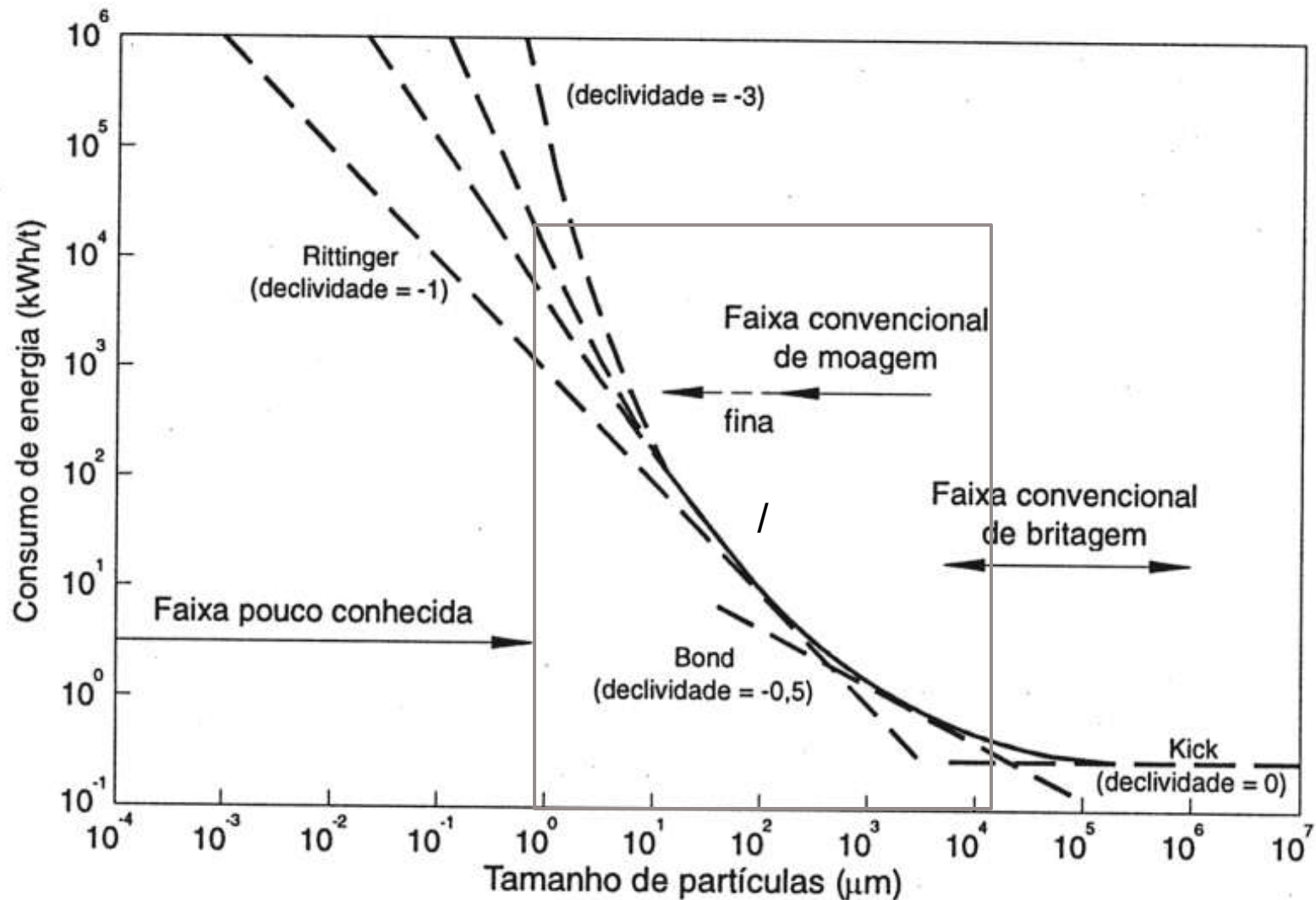
$$dE = -k \frac{dx}{x^n}$$

$$n = 2 \Rightarrow E = k_2 \cdot (1/P - 1/F) = \text{Rittinger}$$

$$n = 1 \Rightarrow E = k_1 \cdot \ln (F/P) = \text{Kick}$$

$$n = 1,5 \Rightarrow E = k_3 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right) = \text{Bond}$$

Cominuição – estimativa de consumo energético



Cominuição – estimativa de consumo energético

Somente Bond deu certo ! como Bond trabalhou ?

1 – a Allis Chalmers era a maior produtora de moinhos.

Ele verificou cada moinho vendido por ela.

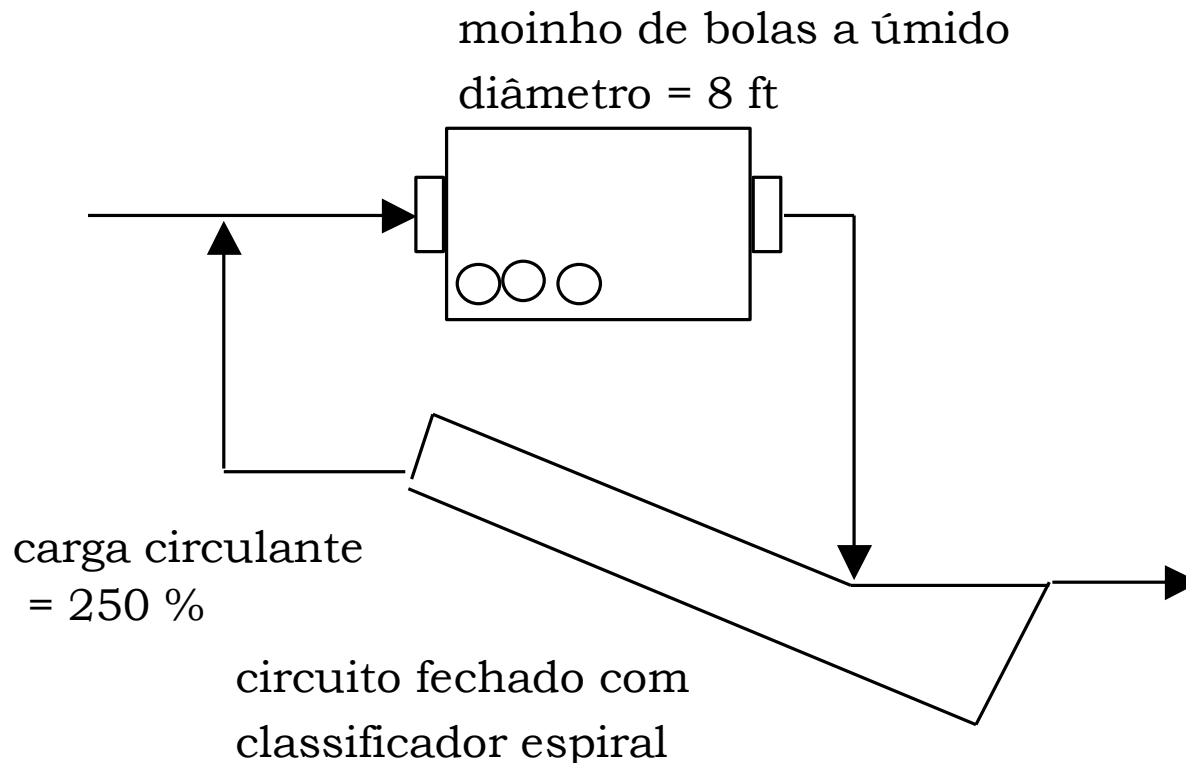
2 – para os moinhos que estavam operando de maneira satisfatória, ele monitorou toda a operação durante certo período de tempo, tomando amostras do material processado.

3 – levou estas amostras para a sua usina piloto em Milwaukee e ensaiou-a em condições controladas.

Cominuição – estimativa de consumo energético

Somente Bond deu certo ! como Bond trabalhou ?

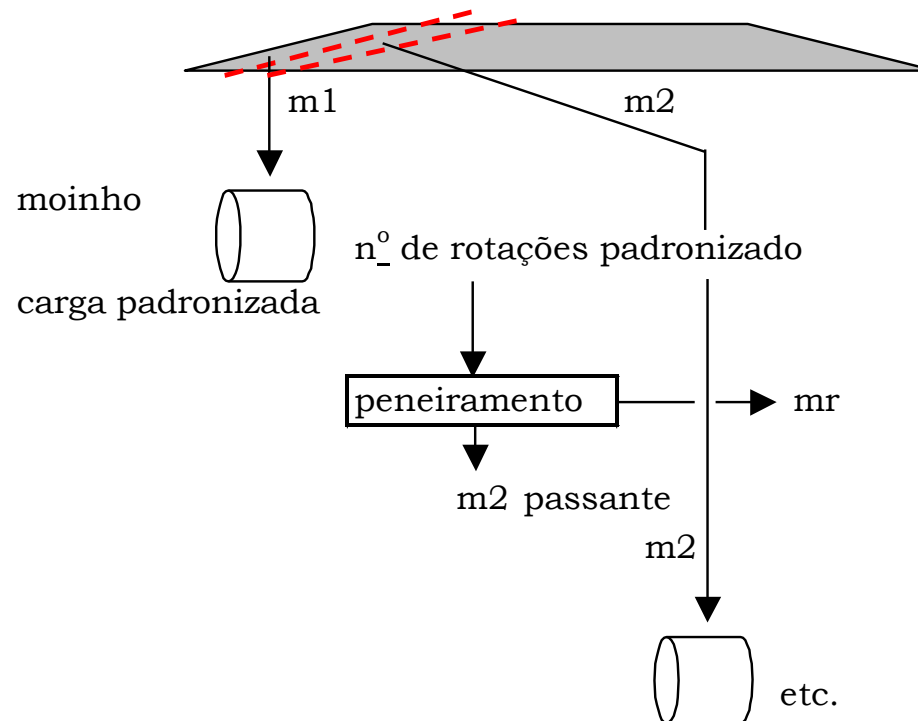
3 – levou estas amostras para a sua usina piloto em Milwaukee e ensaiou-a em condições controladas.



Cominuição – estimativa de consumo energético

como Bond trabalhou ?

4 – ensaiou a mesma amostra em laboratório:



Cominuição – estimativa de consumo energético

Ensaio de Bond:

- Moinho padrão de 30,48 x 30,48 cm;
- 70 rpm (91,4% da V_c);
- Carga de bolas padrão:

	diâmetro	número de bolas	peso	
(mm)	(in)		(g)	%
36,5	1 7/16	43	9.094	45,2
29,4	1 5/32	67	7.444	37,0
25,4	1	10	694	3,5
19,0	3/4	71	2.078	10,3
15,9	5/8	94	815	4,0
total		285	20.125	

Cominuição – estimativa de consumo energético



Ensaio de Bond:

- Moagem e peneiramento até que a CC estabilize em 250%;
- Alguns laboratórios exigem no mínimo 7 ciclos;

Cominuição – estimativa de consumo energético

O procedimento para a execução do ensaio, com a alimentação previamente britada e 100% passante em 3,35 mm, consiste das seguintes etapas:

1) Montar pilha longitudinal.

2) Proceder à análise granulométrica da alimentação.

Representar em gráfico a porcentagem passante acumulada na ordenada e a abertura das peneiras na abscissa, em μm .

Determinar, por interpolação, A, ou seja, a abertura da peneira através da qual 80% da massa da alimentação é passante.

Cominuição – estimativa de consumo energético

3) Retirar uma alíquota de material da pilha montada e colocá-la em proveta graduada de 1000 ml. Compactar levemente o material, vibrando-o. Completar o volume até 700 ml. Pesar este material. Este valor é a massa da alimentação do ensaio (M), sendo dado em gramas.

4) Calcular Aar , que é a massa da alimentação que deveria ser acrescentada quando em regime estacionário, a qual é igual a $M/3,5$, com o objetivo de se atingir uma carga circulante de 250%.

5) O professor definirá a abertura da malha de classificação do ensaio (A_m). Essa abertura deve ser próxima àquela que fechará o circuito de moagem industrialmente.

Cominuição – estimativa de consumo energético

- 6) Carregar o moinho com a carga de bolas e o material contido na proveta. Para o 1º ciclo, moer o material por um número definido de rotações, por exemplo, 50 ou 100, dependendo das características do material quanto à moagem.
- 7) Determinar por peneiramento a massa passante em Am. Para o primeiro ciclo esse valor denomina-se Ma_1 (coluna 3 na Tabela) e pode ser estimado diretamente da análise granulométrica do material inicial.
- 8) Descarregar o moinho e peneirar o material em Am, recomendando-se a utilização de peneiras de alívio. Determinar a massa retida (coluna 4). A massa do material passante (Mp_i) é calculada por diferença, evitando-se a introdução de erros por perda de ultrafinos. Esta é a alimentação nova a acrescentar para o próximo ciclo (coluna 5).

Cominuição – estimativa de consumo energético

9) Descartar o material passante (exceto no último ciclo).

10) Subtrair Ma_i (coluna 3) de Mp_i (coluna 5). Este valor é passante líquido gerado no ciclo i (coluna 6).

11) Recompôr a alimentação nova igual a Mp_i , à massa retida. Utiliza-se para isto de incremento tirado da amostra inicial.

12) Calcular a massa passante em Am contida no material que será introduzido no moinho a partir da análise granulométrica. Este é o valor de M_{ai+1} (coluna 3).

13) Subtrair o valor da alimentação nova a acrescentar (Mp_i) de Aar determinada no item d. A diferença é o desvio correspondente ao ciclo i (coluna 7).

Cominuição – estimativa de consumo energético

14) Dividir a quantidade líquida passante, determinada no item j (coluna 6) pelo respectivo número de rotações aplicado (coluna 2). Este valor é denominado mobilidade (Mob_j - coluna 8), e corresponde à massa em gramas passante em Am gerada em cada rotação do moinho.

15) Carregar novamente o moinho. Calcular o número de rotações para o ciclo seguinte (N_{i+1}), (coluna 2) por meio da seguinte fórmula:

$$Nr_{i+1} = \frac{Aar - Ma_{i+1}}{Mob_i}$$

Cominuição – estimativa de consumo energético

- 16) Proceder à moagem com o número de rotações calculado.
- 17) Repetir as operações descritas nos itens de g a p.
- 18) Prosseguir o número de ciclos até que os valores de Mob_i (coluna 8) atinjam o equilíbrio ou invertam a tendência de crescimento ou decréscimo, em três ciclos. A verificação desse equilíbrio é feita extraíndo-se a média aritmética dos três últimos valores de Mob_i , não devendo a diferença entre o maior e o menor valor ser superior a 5% em relação ao valor médio.

Cominuição – estimativa de consumo energético

19) Uma vez alcançado o equilíbrio, proceder à análise granulométrica do minério passante em Am do último ciclo (a seco). O valor P corresponde à abertura da peneira onde 80% da massa do produto é passante, e é encontrado através de interpolação em um gráfico, no qual a % passante é colocada em ordenada e a abertura das peneiras, em μm , em abscissa.

Cominuição – estimativa de consumo energético

moinho para ensaio de WI



Cominuição – estimativa de consumo energético

AVERAGE WORK INDEX OF SELECTED MINERALS
(Source: Chem Eng. Handbook, R.O.Perry & C.H.Chilton, Int Student's ed, McGraw Hill, p 8-11, and SME Mineral Processing Handbook, Weiss (ed), 1985 p 3A-27)

$$WI = \frac{(11)(44,5)}{Am^{0,23} Mob^{0,82} \left(\frac{10}{\sqrt{P}} - \frac{10}{\sqrt{A}} \right)}$$

MINERAL	Sp. Gr	Bond Work Index	MINERAL	Sp.Gr	Bond Work Index
Barite	4.28	6.24	Phosphate Rock	2.66	10.13
Basalt	2.89	20.41	Pyrite Ore	3.48	8.9
Bauxite	2.38	9.45	Pyrrhotite Ore	4.04	9.57
Cement Clinker	3.09	13.49	Quartzite	2.71	12.18
Chrome Ore	4.06	9.6	Rutile	2.84	12.12
Coal	1.63	11.37	Sandstone'	2.68	11.53
Coke	1.51	20.70	Silica	2.71	13.53
Copper Ore	3.02	13.13	Silicon Carbide	2.73	26.17
Diorite	2.78	19.4	Silver Ore	2.72	17.30
Dolomite	2.82	11.31	Spodumene	2.75	13.70
Feldspar	2.59	11.67	Tin Ore	3.94	10.81
Flint	2.65	26.16	Titanium Ore	4.23	11.88
Fluorspar	2.98	9.76	Uranium Ore	2.70	17.93
Galena	5.39	10.19	Zinc Ore	3.68	12.42
Garnet	3.30	12.37			
Gold Ore	2.86	14.83			
Granite	2.68	14.39			
Graphite	1.75	45.03			
Gypsum Rock	2.69	8.16			
Ilmenite	4.27	13.11			
Iron Ore (Hematite)	3.76	12.68			
Iron Ore(Specular Hematite)	3.29	15.4			
Iron Ore(Magnetite)	3.88	10.21			
Iron Ore (Tachonite)	3.52	14.87			
Kyanite	3.23	18.87			
Lead Ore	3.44	11.40			
Lead-Zinc Ore'	3.37	11.35			
Limestone	2.69	11.61			
Manganese Ore	3.74	12.46			
Mica	2.89	134.5			
Nickel Ore	3.32	11.88			

Cominuição – estimativa de consumo energético



Exercícios

1) calcule o WI a partir dos dados plotados nas tabelas abaixo:

Cominuição – estimativa de consumo energético

Exercícios

2) calcule o consumo energético específico esperado para a moagem do material do exercício anterior a partir de um valor de 80% passante igual a 7,5 mm até um valor de 80% passante no produto igual a 0,075 mm. Para isso, use a “lei de Bond”, dada por:

$$W = 10 Wi \left(\frac{1}{\sqrt{P'}} - \frac{1}{\sqrt{A'}} \right)$$

Cominuição – estimativa de consumo energético

Exercícios

3) Calcular o consumo energético específico do circuito de moagem convencional cujos dados são fornecidos:

Dados:

Potência utilizada no moinho de bolas: 15 MW

Vazão de alimentação: 1.600 t/h

Cominuição – estimativa de consumo energético

Exercícios

4) Calcular o WI operacional para o circuito de moagem convencional. Comparar o resultado do WI operacional do circuito convencional com o WI de laboratório (usar equação de Bond).

Dados:

$$F_{80} = 2,5 \text{ mm}$$

$$P_{80} = 0,150 \text{ mm}$$

$$\text{WI de laboratório} = 17 \text{ kWh/t}$$

Cominuição – estimativa de consumo energético

Exercícios

5) Considerando-se a operação atual do moinho de bolas, pergunta-se:

a) qual seria a vazão de alimentação considerando-se um P_{80} de 0,210 mm? E um P_{80} de 0,23 mm?

b) Qual seria a taxa de alimentação para um F_{80} de 5 mm? E 9 mm?

FONTES:

- NBR11376 – Moinho de bolas – determinação do índice de trabalho. ABNT. 1990.
- Mineral Processing Technology – Barry Wills e Tim Nappier-Munn. 2006.
- Chaves, A. P. Teoria e prática do tratamento de minérios. Vol. 3. 2006.
- Manual de britagem Metso. 6 edição. 2005.
- Gupta, A.; Yan, D.; **Mineral processing design and operation: an introduction**. Elsevier, 2006. 693 p. Disponível em:
<<http://www.sciencedirect.com/science/book/9780444516367>>
- Imagens e vídeos google images
- Imagens do autor