

Curso de especialização em tratamento de minérios

Cominuição

Dimensionamento de moinhos de bolas e barras

Poços de Caldas – 10 de Novembro de 2012

Professor Mauricio Guimarães Bergerman

Cominuição – seleção de alternativas

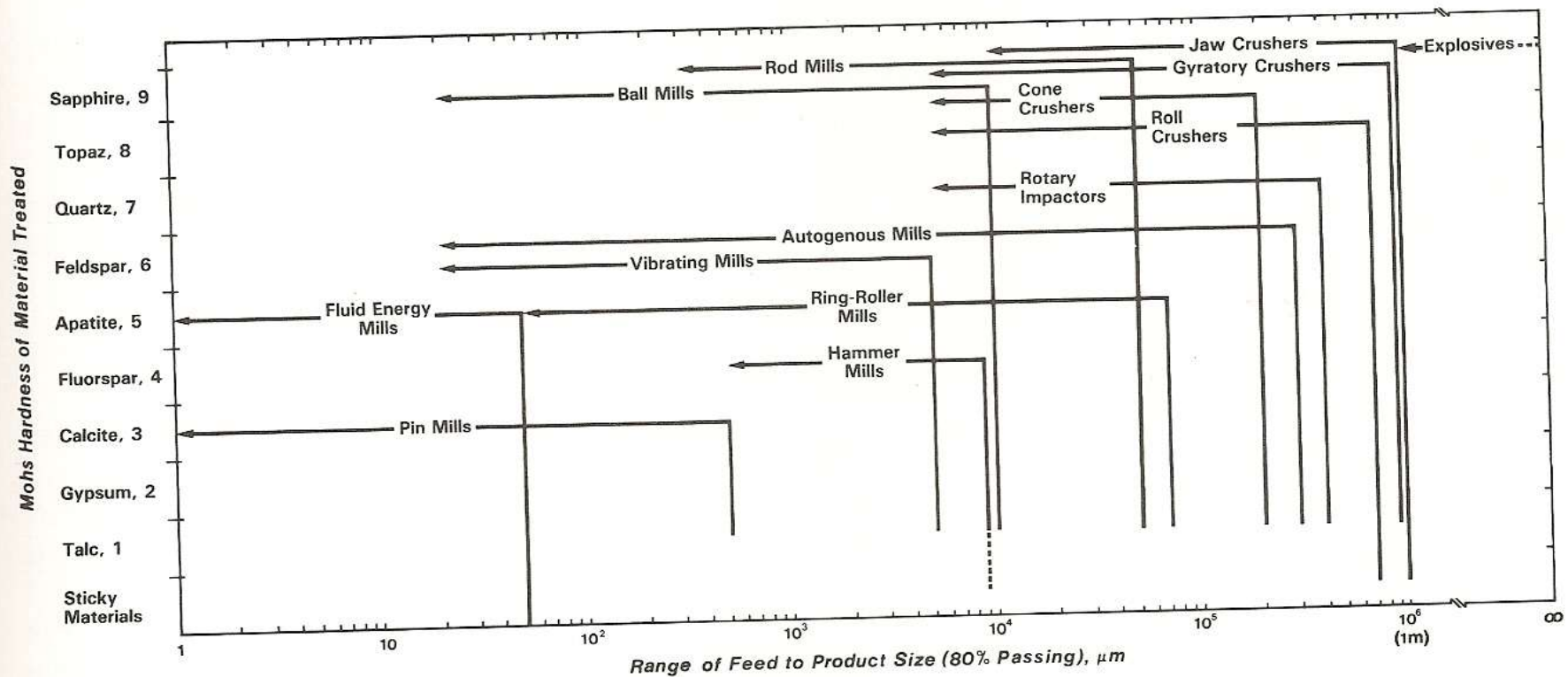


Figure II.1. Applicability of size reduction equipment.

Moagem - Dimensionamento

- Existem diversos métodos de dimensionamento de moinhos:
 - ▣ Fabricantes;
 - ▣ Simulação;
 - ▣ **Bond e Rowland**

$$E = \frac{P}{Q} = 10 * WI * \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)$$

Moagem - Dimensionamento

□ Bond e Rowland

- ▣ Bond: moinho de 8 ft, úmido, cc de 250%;
- ▣ Necessário utilizar fatores de correção para situação diferentes: Rowland

$$E_{ou} W = \frac{P}{Q} = 10 * WI * \left(\frac{1}{\sqrt{P}} - \frac{1}{\sqrt{F}} \right)$$

Moagem - Dimensionamento

- Bond e Rowland – fatores de correção
- EF1: Moagem à seco – multiplicar o valor de W por 1,3
 - ▣ Moagem a seco consome 30% mais energia que a moagem a úmido.

Moagem - Dimensionamento

- Bond e Rowland – fatores de correção
- EF2: Moinho de bolas em circuito aberto
 - ▣ Para operação em circuito aberto, é necessário fornecer mais energia.

% do produto menor que o nominal	EF2
50	1,035
60	1,05
70	1,10
80	1,20
90	1,40
92	1,46
95	1,57
98	1,70

Moagem - Dimensionamento

- Bond e Rowland – fatores de correção

- EF3: Diâmetro interno do moinho.

- ▣ Se o diâmetro for diferente de 8 ft.

$$EF3 = \left(\frac{8}{D}\right)^{0,2} \quad \text{Se } D \text{ estiver expresso em ft, ou}$$

$$EF3 = \left(\frac{2,44}{D}\right)^{0,2} \quad \text{Se } D \text{ estiver expresso em m, ou}$$

- ▣ A Metso recomenda a não aplicação deste fator a moinhos maiores que 8 ft (como fator de segurança).

Moagem - Dimensionamento

- Bond e Rowland – fatores de correção
- EF4: Alimentação muito grossa:
 - Quando a alimentação é muito grossa, energia adicional será necessária, tendo em vista a não adequação da distribuição de bolas/barras.
 - O tamanho ótimo de alimentação é dado por:

Moinho de barras:

$$Fo = 16.000 * \sqrt{\frac{13}{WI}}$$

Moinho de bolas:

$$Fo = 4.000 * \sqrt{\frac{13}{WI}}$$

- Se $F < Fo$, EF4 não é aplicado. Caso contrário, multiplica-se W por:

$$EF4 = \frac{RR + (WI - 7) * \left(\frac{F - Fo}{Fo}\right)}{RR}$$

Moagem - Dimensionamento

- Bond e Rowland – fatores de correção
- EF5: Moagem extremamente fina:
 - P_{80} menores que 0,074 mm necessitam corpos moedores menores que os fabricados industrialmente. Por isso, são utilizadas bolas maiores, com perda de eficiência.

$$EF5 = \frac{P + 10,3}{1,145 * P}$$

Moagem - Dimensionamento

- Bond e Rowland – fatores de correção
- EF6: Relação de redução ótima de moinhos de barras:
 - A relação de redução ótima de moinhos de barras é:

$$RRo = 8 + \left(\frac{5 * L}{D} \right)$$

- Onde L é o comprimento das barras e D o diâmetro interno do moinho, ambos em pés. Quando a RR se afastar da ótima ($RR > Rro + 2$ ou $RR < Rro - 2$), usar o EF6:

$$EF6 = 1 + \frac{(RR - RRo)^2}{150}$$

- Metso recomenda considerar o Rro a metade do calculado em moinhos de descarga central;
- Peres e Machado (1988) recomendam usar o $EF6 = 1,2$ para $WI < 7 \text{ kWh/st}$ e $Rro - 2 < RR < Rro + 2$

Moagem - Dimensionamento

- Bond e Rowland – fatores de correção
- EF7: Relação de redução de moinho de bolas menor que 6:
 - ▣ O EF7 só deve ser utilizado para moinhos de bolas com RR menores que 6:1.

$$EF7 = \frac{RR - 1,22}{RR - 1,35}$$

Moagem - Dimensionamento

- Bond e Rowland – fatores de correção
- EF8: Fator de ineficiência dos moinhos de barras:
 - O método de Bond contempla o moinho de barras após britagem quartenária em circuito fechado e antes de um moinho de bolas. Variações nas características das barras de moinhos industriais também geram impactos Em casos diferentes, é necessário acrescentar potência:
 - Moinho de barras sozinho no circuito de moagem:
 - $EF8 = 1,4$ se a alimentação vier de um circuito aberto de britagem;
 - $EF8 = 1,2$ se a alimentação vier de um circuito fechado de britagem;
 - Moinho de barras em conjunto com moinho de bolas, sem classificação entre ambos:
 - $EF8 = 1,2$ se a alimentação vier de um circuito aberto de britagem;
 - $EF8 = 1,0$ se a alimentação vier de um circuito fechado de britagem e se ela tiver $F \leq 1/2''$;
 - $EF8 = 1,2$ se a alimentação vier de um circuito fechado de britagem e se ela tiver $F \geq 1/2''$.

Moagem - Dimensionamento

- Caso não se disponham de valores de WI – ressaltando-se que para projetos, é necessário medir esse valor, manuais de fornecedores fornecem valores aproximados:
 - ▣ Metso – 6 edição – pá. 4-24

Moagem - Dimensionamento

Metso – moinho de barras

Diâmetro interno nominal		Comprimento nominal		Comprimento das barras (L)		L / D	Velocidade do moinho			Densidade aparente da carga de barras		Peso da carga de barras			Potência do moinho (hp)			Diâmetro (D) interior ao revestimento	
												t métricas							
												% volume da carga			% volume da carga				
m	pés	m	pés	m	pés		rpm	% Cs	fpm	kg / m³	lb / ft³	35%	40%	45%	35%	40%	45%	m	pés
0,91	3,0	1,22	4	1,07	3,5	1,4	36,1	74,5	284	5847	365	1,0	1,13	1,27	7	8	8	0,76	2,5
1,22	4,0	1,83	6	1,68	5,5	1,57	30,6	74,7	336	5847	365	2,24	2,58	2,9	23	25	26	1,07	3,5
1,52	5,0	2,44	8	2,29	7,5	1,67	25,7	71,2	363	5847	365	6,91	7,95	8,89	57	61	64	1,37	4,5
1,83	6,0	3,05	10	2,90	9,5	1,73	23,1	70,7	399	5847	365	13,1	15,0	16,8	114	122	128	1,68	5,5
2,13	7,0	3,35	11	3,20	10,5	1,62	21,0	69,9	428	5766	360	20,0	27,8	25,5	181	194	204	1,98	6,5
2,44	8,0	3,66	12	3,51	11,5	1,53	19,4	69,3	457	5766	360	29,0	33,2	37,4	275	295	310	2,29	7,5
2,59	8,5	3,66	12	3,51	11,5	1,44	18,7	69,0	470	5766	360	33,0	37,7	42,5	318	341	359	2,44	8,0
2,74	9,0	3,66	12	3,51	11,5	1,38	17,9	67,5	470	5766	360	36,0	41,1	45,5	344	369	388	2,55	8,35
2,89	9,5	3,96	13	3,81	12,5	1,41	17,4	67,6	483	5606	350	42,7	48,8	54,9	416	446	470	2,70	8,85
3,05	10,0	4,27	14	4,11	13,5	1,44	16,8	67,0	493	5606	350	51,5	59,0	63,8	507	544	572	2,85	9,35
3,20	10,5	4,57	15	4,42	14,5	1,47	16,7	66,4	501	5606	350	61,4	70,1	78,9	609	653	687	3,00	9,85
3,35	11,0	4,88	16	4,72	15,5	1,50	15,8	66,8	517	5606	350	72,5	82,8	93,5	735	788	823	3,15	10,35
3,51	11,5	4,88	16	4,72	15,5	1,43	15,5	66,6	528	5606	350	79,7	90,7	103	819	878	924	3,31	10,85
3,66	12,0	4,88	16	4,72	15,5	1,37	15,1	66,4	538	5606	350	82,7	99,8	112	906	972	1023	3,46	11,35
3,81	12,5	5,49	18	5,34	17,5	1,48	14,7	66,0	547	5446	340	104	119	134	1093	1173	1234	3,61	11,55
3,96	13,0	5,79	19	5,64	18,5	1,50	14,3	65,6	555	5446	340	120	137	154	1264	1356	1426	3,76	12,35
4,11	13,5	5,79	19	5,64	18,5	1,44	14,0	65,5	569	5446	340	130	146	166	1385	1486	1562	3,92	12,85
4,27	14,0	6,10	20	5,94	19,5	1,46	13,6	64,9	570	5446	340	147	169	190	1580	1695	1783	4,07	13,35
4,42	14,5	6,10	20	5,94	19,5	1,41	13,3	64,6	579	5446	340	159	181	204	1715	1840	1935	4,22	13,85
4,57	15,0	6,10	20	5,94	19,5	1,36	13,0	64,3	586	5446	340	171	194	219	1853	1988	2091	4,37	14,35

Fonte:

Moagem - Dimensionamento

Metso – moinho de bolas

Diâmetro nominal		Comprimento nominal		Tamanho das bolas		Velocidade			Peso da carga de bolas			Potência do moinho (hp)						Diâmetro (D) interior ao revestimento	
									t métricas			Descarga "overflow"			Descarga por diafragma				
									% volume de carga			% volume de carga			% volume de carga				
m	pés	m	pés	mm	pol	rpm	%Cs	fpm	35%	40%	45%	35%	40%	45%	35%	40%	45%	m	pés
0,91	3,0	0,91	3,0	50	2,0	38,7	79,9	304	0,68	0,77	0,87	7	7	7	8	8	9	0,76	2,5
1,22	4,0	1,22	4,0	50	2,0	32,4	79,1	356	1,77	2,02	2,28	19	20	21	22	24	25	1,07	3,5
1,52	5,0	1,52	5,0	50	2,0	28,2	78,1	399	3,66	4,19	4,71	42	45	47	49	52	54	1,37	4,5
1,83	6,0	1,83	6,0	50	2,0	25,5	78,0	441	6,56	7,50	8,44	80	85	89	93	99	103	1,68	5,5
2,13	7,0	2,13	7,0	50	2,0	23,2	77,2	474	10,7	12,3	13,8	137	145	151	158	168	175	1,98	6,5
2,44	8,0	2,44	8,0	50	2,0	21,3	76,1	502	16,2	18,6	21,0	215	228	237	249	265	275	2,29	7,5
2,59	8,5	2,44	8,0	50	2,0	20,4	75,3	513	18,5	21,1	23,8	250	266	277	290	308	321	2,44	8,0
2,74	9,0	2,74	9,0	50	2,0	19,7	75,0	526	23,5	26,9	30,2	322	342	356	373	397	413	2,55	8,5
2,89	9,5	2,74	9,0	50	2,0	19,15	75,0	541	26,4	30,1	33,9	367	390	406	425	453	471	2,71	9,0
3,05	10,0	3,05	10,0	50	2,0	18,65	75,0	557	32,7	37,3	42,0	462	491	512	535	570	593	2,89	9,5
3,20	10,5	3,05	10,0	50	2,0	18,15	75,0	570	36,1	41,4	46,5	519	552	575	602	640	667	3,05	10,0
3,35	11,0	3,35	11,0	50	2,0	17,3	72,8	565	43,0	49,2	55,4	610	649	676	708	753	784	3,17	10,4
3,51	11,5	3,35	11,0	50	2,0	16,75	72,2	574	49,1	54,0	60,6	674	718	747	782	832	867	3,32	10,9
3,66	12,0	3,66	12,0	50	2,0	16,3	71,8	584	56,4	64,4	72,5	812	864	900	942	1003	1044	3,47	11,4
3,81	12,5	3,66	12,0	50	2,0	15,95	71,8	596	61,4	70,2	79,0	896	954	993	1040	1106	1152	3,63	11,9
3,96	13,0	3,96	13,0	50	2,0	15,60	71,7	607	72,3	82,7	92,6	1063	1130	1177	1233	1311	1365	3,78	12,4
4,11	13,5	3,96	13,0	64	2,5	15,30	71,7	620	78,2	89,4	99,8	1189	1266	1321	1379	1409	1532	3,93	12,9
4,27	14,0	4,27	14,0	64	2,5	14,8	70,7	623	90,7	104	117	1375	1464	1527	1595	1699	1771	4,08	13,4
4,47	14,5	4,27	14,0	64	2,5	14,55	70,8	635	98,0	112	126	1492	1588	1656	1730	1842	1921	4,24	13,9
4,57	15,0	4,57	15,0	64	2,5	14,1	69,8	638	113	129	144	1707	1817	1893	1980	2107	2196	4,39	14,4
4,72	15,5	4,57	15,0	64	2,5	13,85	69,6	648	121	138	155	1838	1956	2037	2132	2234	2363	4,54	14,9
4,88	16,0	4,88	16,0	64	2,5	13,45	68,9	651	137	157	179	2084	2217	2309	2417	2521	2678	4,69	15,4
5,03	16,5	4,88	16,0	64	2,5	13,2	68,7	659	146	167	188	2229	2370	2468	2585	2750	2803	4,85	15,9
5,18	17,0	5,18	17,0	75	3,0	13,0	68,7	670	165	189	212	2595	2764	2883	3010	3206	3344	5,00	16,4
5,33	17,5	5,18	17,0	75	3,0	12,7	68,1	674	176	201	226	2750	2929	3053	3190	3397	3542	5,15	16,9
5,49	18,0	5,49	18,0	75	3,0	12,4	67,5	678	197	225	253	3077	3276	3414	3560	3800	3961	5,30	Font

Fonte: Metso, 2005

Moagem - Dimensionamento

- Para comprimentos diferentes dos tabelados, a potência consumida varia na proporção direta do comprimento:

$$L_{\text{corrigido}} = \frac{Pot_{\text{corrigida}}}{Pot_{\text{tab}}} * L_{\text{tabelado}}$$

$$Pot_{\text{corrigida}} = W * EFi$$

- Observações:

- Selecionar preferencialmente um moinho com potência nominal (tabelada) menor que a necessária e corrigir seu comprimento depois;
- Não esquecer de conferir a relação L/D;
- Moinho de barras: atentar as barras com 4 a 6" menor que L. Fonte: Metso, 2005

Moagem - Dimensionamento

- Cargas de corpos moedores
 - ▣ Após um período de operação de um moinho com bolas de mesmo tamanho, a carga irá se equilibrar, com diversos tamanhos de bolas – carga sazoadada: melhor adensamento da carga e melhor utilização do volume.
 - ▣ Devemos calcular o tamanho da maior bola, e em seguida qual a carga sazoadada.

Moagem - Dimensionamento

□ Cargas de corpos moedores - bolas

O maior diâmetro de bola para a carga inicial e para a reposição é dado pela seguinte equação:

$$B = \sqrt{\frac{F}{K}} \times \sqrt[3]{\frac{S_g \times W_i}{f_{Cs} \times \sqrt{D}}}$$

Onde:

B = diâmetro da bola em polegadas

F = tamanho da alimentação 80%
passante em μ

S_g = peso específico do material a
moer

W_i = work index (kWh/st)

f_{Cs} = porcentagem da velocidade crítica
(em decimal)

D = diâmetro interno ao revestimento
em pés.

Moagem - Dimensionamento

□ Cargas de corpos moedores - bolas

FATOR K

Tipo de moinho e de circuito			Valor K para bolas de aço ou ferro fundido
Descarga	Moagem (Via)	Circuito	
Overflow	Úmida	Aberto	350
Overflow	Úmida	Fechado	350
Diafragma	Úmida	Aberto	330
Diafragma	Úmida	Fechado	330
Diafragma	Seca	Aberto	335
Diafragma	Seca	Fechado	335

Moagem - Dimensionamento

□ Cargas de corpos moedores - bolas

DISTRIBUIÇÃO DA CARGA DAS BOLAS

Diâmetro da bola calculado		Distribuição do tamanho das bolas para carga de equilíbrio à partida (% do peso total)						
mm	pol.	115mm	100mm	90mm	75mm	65mm	50mm	40mm
115	4,5	23,0						
100	4,0	31,0	23,0					
90	3,5	18,0	34,0	24,0				
75	3,0	15,0	21,0	38,0	31,0			
65	2,5	7,0	12,0	20,5	39,0	34,0		
50	2,0	3,8	6,5	11,5	19,0	43,0	40,0	
40	1,5	1,7	2,5	4,5	8,0	17,0	45,0	51,0
25	1,0	0,5	1,0	1,5	3,0	6,0	15,0	49,0

Moagem - Dimensionamento

□ Cargas de corpos moedores - barras

equação:

$$R = \frac{F^{0,75}}{160} \times \sqrt{\frac{Sg \times Wi}{fCs \times \sqrt{D}}}$$

Onde: os símbolos são os mesmos da equação dada para os moinhos de bolas, exceto R, que é diâmetro da barra em polegadas.

Moagem - Dimensionamento

□ Cargas de corpos moedores - barras

DISTRIBUIÇÃO DA CARGA DE BARRAS

Diâmetro da barra calculado		Distribuição dos diâmetros das barras para carga de equilíbrio à partida (% do peso total)					
mm	pol.	125mm	115mm	100mm	90mm	75mm	65mm
125	5,0	18					
115	4,5	22	20				
100	4,0	10	23	20			
90	3,5	14	20	27	20		
75	3,0	11	15	21	33	31	
65	2,5	7	10	15	21	39	34
50	2,0	9	12	17	26	30	66

Moagem - Dimensionamento

- Fornecedores de moinhos de bolas e barras:
 - ▣ Metso,
 - ▣ FLSmith;
 - ▣ KHD;
 - ▣ Polysius;
 - ▣ Furlan, MDE,
 - ▣ Cytic, Lipu, Kefid, Joyal, SBM, Henan;

Moagem - Dimensionamento

- Exercícios:
- 23) Selecionar moinhos para os seguintes circuitos:

b) Moinho de bolas

- Circuito fechado, moagem via úmida, alimentação proveniente de moinho de barras
- Vazão de alimentação: 550 t/h com F_{80} de 12# Tyler (1,41 mm)
- W_i do minério de 12,1 kWh/t
- A_i de 0,5
- Produto requerido: P_{80} de 150# Tyler (0,105 mm)

Considerar a densidade do minério de 2,8 t/m³.

Moagem - Dimensionamento

□ Exercícios:

24) Para o exercício anterior, calcular:

- diâmetro das bolas a serem empregadas;
- distribuição de tamanhos da carga inicial de bolas.

25) Para o mesmo exercício, estimar o desgaste de corpos moedores e revestimentos, de forma a obter:

- consumo específico de bolas em g/kWh (t de minério processado);
- período (h) de reposição da carga de bolas, assumindo-se reposição à cada ponto percentual de decréscimo da carga, informando a massa de bolas repostas.

Moagem - Dimensionamento

□ Exercícios:

- 26) Estimar os custos operacionais do circuito de moagem, relativos à:
- consumo de energia, considerando-se R\$ 230/MWh
 - consumo de corpos moedores, considerando-se USD 2,5/kg de bolas.

Moagem - Dimensionamento

□ Rowland e Kjos (1978): Cálculo da potência do moinho:

▣ Moinho de barras:

$$(\text{kW/t barras}) = 1,07 \cdot D^{1/3} \cdot (6,3 - 5,4 \cdot \text{Enchimento}) \cdot V_c$$

▣ Moinho de bolas:

$$(\text{kW/t bolas}) = 3,1 \cdot D^{0,3} \cdot (3,2 - 3 \cdot \text{Enchimento}) \cdot V_c \cdot (1 - 0,1/2^{(9-10 \cdot V_c)}) + S$$

$$S = \frac{B - \frac{3D}{20}}{2} \quad (\text{Para moinhos maiores que 3,3 m})$$

- D em pés;
- Enchimento em %
- V_c em decimal (fração da velocidade crítica)
- B é o tamanho da bola em pol

Moagem - Dimensionamento

- Rowland e Kjos (1978): Cálculo da potência do moinho:
 - ▣ Recomendam ajustar o valor determinado de potência por:
 - Moagem a seco, diafragma no nível mais baixo: 1,16;
 - Moagem a seco, diafragma no nível mais alto: 1,08.
 - ▣ As tabelas fornecidas pelos fabricantes se baseia nesta fórmula.
 - ▣ Para moinhos com revestimentos de borracha, devem ser considerados de 5 a 10% de potência adicional.

FONTES:

- Mineral Processing Technology – Barry Wills e Tim Nappier-Munn. 2006.
- Chaves, A. P. Teoria e prática do tratamento de minérios. Vol. 3. 2009.
- Manual de britagem Metso, 6 edição, 2005.
- NAPIER-MUNN, T.J. et al. Mineral comminution circuits: their operation and optimization. Indoorroopilly: Julius Kruttschnitt Mineral Research Centre/University of Queensland, 1999 413 p. (JKMRC Monograph Series in Mining and Mineral Processing)
- Gupta, A.; Yan, D.; **Mineral processing design and operation: an introduction**. Elsevier, 2006. 693 p. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/book/9780444516367>
- ROWLAND, C.A.; KJOS, D.M. Rod and ball mills. In: **Mineral processing plant design**. AIME, 1978. p. 239 – 278.
- ROWLAND Jr, C. A. Selection of rod mills, ball mills and regrind mills. In: MINERAL PROCESSING PLANT DESIGN, PRACTICE, AND CONTROL, 2002, Vancouver. Proceedings: MINERAL PROCESSING PLANT DESIGN, PRACTICE, AND CONTROL, 2002. Littleton: SME, 2002. v. 1, p. 710 - 754.
- Imagens e vídeos google images
- Imagens do autor